



TESIS - ME 142516

STUDI NUMERIK TURBIN DARRIEUS-SAVONIUS
UNTUK KONVERSI ENERGI ARUS LAUT
KECEPATAN RENDAH DENGAN MENGGUNAKAN
SIMULASI CFD

ERIFIVE PRANATAL

4114204009

DOSEN PEMBIMBING

Ir. AGUK ZUHDI M. F, M.ENG., Ph.D

PROGRAM MAGISTER

TEKNIK SISTEM DAN PENGENDALIAN KELAUTAN

PROGRAM PASCASARJANA TEKNOLOGI KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

1



THESES - ME 142516

NUMERICAL STUDY DARRIEUS SAVONIUS
TURBINE FOR ENERGI CONVERSION AT LOW
SPEED MARINE CURRENT USING CFD
SIMULATION

ERIFIVE PRANATAL
4114204009

SUPERVISOR
Ir. AGUK ZUHDI M. F, M.ENG., Ph.D

MAGISTER PROGRAM
SYSTEM AND MARINE CONTROL ENGINEERING
MAGISTER PROGRAM IN MARINE TECHNOLOGY
FAKULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016

LEMBARAN PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh
gelar
Magister Teknik
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh
Erifive Pranatal
Nrp. 4114204009

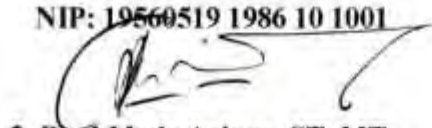
Tanggal Ujian: 22 Juli 2016
Periode Wisuda: September 2016

Disetujui oleh:



1. Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah, M. Eng., Ph.D (Pembimbing)

NIP: 19560519 1986 10 1001



2. Dr. I Made Ariana, ST, MT (Penguji)
NIP: 19710610 1995 12 1001



3. Semin, ST, MT, Ph.D (Penguji)
NIP: 19710110 1997 02 1001



Direktur Program Pascasarjana,


Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D
NIP. 19601202 198701 1 001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

STUDI NUMERIK TURBIN DARRIUES SAVONIUS UNTUK KONVERSI ENERGI ARUS LAUT KECEPATAN RENDAH DENGAN MENGGUNAKAN SIMULASI CFD

Nama Mahasiswa : Erifive Pranatal
NRP : 4114204009
Dosen pembimbing : Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah, M. Eng., Ph.D

ABSTRAK

Penggunaan energi terbarukan yang ramah lingkungan tanpa emisi gas buang telah banyak dikembangkan seperti pemanfaatan energi kinetik dari arus air laut menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin. Tipe turbin yang digunakan antara lain adalah turbin sumbu vertikal Darrieus dan Savonius. Turbin Savonius cocok digunakan untuk arus laut kecepatan rendah sedangkan turbin Darrieus memiliki koefisien daya yang tinggi. Sehingga kombinasi kedua turbin ini akan dipelajari. Penelitian ini menggunakan dua model turbin kombinasi Darrieus-Savonius yakni model A dan model B. Untuk mengetahui kinerja turbin tersebut dilakukan analisa *Computatioanl Fluid Dynamics* (CFD) dengan menggunakan *software ANSYS Fluent*. Data kecepatan arus diambil dari kecepatan rata-rata perairan di sebelah barat Pulau Giliyang-Madura, selama 2 tahun (2014-2015) yakni 0,269 m/s. Hasil perhitungan CFD menunjukkan turbin kombinasi model B menghasilkan koefisien daya maksimum sebesar 0,256 pada *tip speed ratio* 1,6 dan memiliki kinerja 34% lebih baik dari turbin Savonius.

Kata kunci: CFD, *renewable energy* ,turbin darrieus-savonius

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

NUMERICAL STUDY DARRIEUS SAVONIUS TURBINE FOR ENERGI CONVERSION AT LOW SPEED MARINE CURRENT USING CFD SIMULATION

By : Erifive Pranatal
Student Identity Number : 4114204009
Supervisor : Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah, M. Eng., Ph.D

ABSTRACT

Using clean energy and without gas emission has been developed now day. Such as using kinetic energy from marine current with marine turbine. Kind of turbine is Darrieus and Savonius vertical Turbine. Savonius turbine suitable for the characteristics of ocean currents at low speed, while Darrieus Turbine has high power coefficient. So the combination of the two turbine is studied. This study uses two model of combination Darrieus Savonius turbine namely the model A and the model B. CFD simulation using software ANSYS Fluent carried out to know performance of Darrieus – Savonius turbine. The average speed of ocean current is obtained from the sea at Giliyang, Madura Island for 2 years (2014-2015) that is 0.269 m/s. The results of the CFD calculations show that the combination of turbine model B generate the peak power coefficient 0.256 at tip speed ratio 1.6 and has 34% performance better than the turbine Savonius.

Key words: CFD, darrieus-savonius turbine, renewable energy

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBARAN PENGESAHAN.....	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2	5
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1. Kajian Pustaka.....	5
2.2. Dasar Teori.....	8
2.2.1. Energi dari Arus Air.....	8
2.2.2. Karakteristik Aerodinamika <i>Airfoil</i>	9
2.2.3. Turbin Sumbu Vertikal	11
2.2.4. Kinerja dari Turbin	13
2.2.5. CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)	14
BAB 3	21
METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1. Identifikasi dan Perumusan Masalah	21
3.2. Objek Penelitian	21
3.3. Diagram Alur Penelitian	21
3.4. Studi Literatur	23
3.5. Pengumpulan Data	23
3.6. Penentuan Ukuran dan Pembuatan Geometri Turbin.....	23

3.7. Simulasi dan Pengambilan Data	25
3.8. Analisa Data	26
3.9. Kesimpulan dan Saran	26
BAB 4	27
PEMBAHASAN.....	27
4.1. Data Kecepatan Arus Laut Permukaan di Sebelah Barat Pulau Giliyang ..	27
4.2. Geometri Turbin dan <i>Computational Domain</i>	27
4.3. <i>Domain Meshing</i>	29
4.4. Solusi Numerik.....	31
4.4.1 Penentuan Ukuran dan Jumlah <i>Time Steps</i>	31
4.4.2. Penentuan Jumlah Maksimum Iterasi	33
4.4.3. <i>Study Grid Independence</i>	34
4.4.4. Kriteria Konvergensi, Model Numerik dan Detail Solver	35
4.5. Perhitungan Koefisien Torsi dan Koefisien Daya Turbin dengan Menggunakan CFD	36
4.5.1. Koefisien Torsi dan Koefisien Daya pada Turbin Model A	37
4.5.2. Koefisien Torsi dan Koefisien Daya pada Turbin Model B	38
4.5.3. Perbandingan Hasil Perhitungan Koefisien Torsi dan Koefisien Daya pada Model A, Model B, Hasil Penelitian Eksperimen Turbin Air Darrieus- Savonius Sahim dkk, (2014) dan Turbin Savonius.....	40
4.6. Efek Sudut <i>Pitch</i> Profil NACA 0018 pada Performa Turbin Darrieus- Savonius	43
5.7. Potensi Energi Listrik dari Arus Laut di Perairan Sebelah Barat Pulau Giliyang, Madura.....	45
BAB 5	47
KESIMPULAN DAN SARAN	47
5.1. Kesimpulan.....	47
5.2. Saran	47
DAFTAR PUSTAKA.....	49
LAMPIRAN	51
BIOGRAFI PENULIS	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Turbin Darrieus dan turbin Savoniu.....	2
Gambar 1.2 Turbin Darrieus-Savonius	2
Gambar 2.1. Model Turbin Kombinasi Darrieus-Savonius Penelitian Abid dkk (2014)	7
Gambar 2.2 Model Turbin Kombinasi Darrieus-Savonius Penelitian Salim, dkk (2014)	7
Gambar 2.3 Nomenklatur Airfoil	10
Gambar 2.4 Diagram Bebas dari Vektor Gaya, Kecepatan dan Sudut Serang pada <i>Blade</i> Turbin Darrieus.....	10
Gambar 2.5 Skema Rotor Savonius	12
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian.....	22
Gambar 3.2 Koordinat x/c Profil NACA 0018	23
Gambar 3.3 Turbin Darrieus-Savonius Model A.....	24
Gambar 3.4 Turbin Darrieus-Savonius Model B	24
Gambar 4.1. <i>Computational Domain</i>	28
Gambar 4.2 Skema <i>Rotating Domain</i>	28
Gambar 4.3 <i>Triangle Mesh</i>	30
Gambar 4.4 <i>Mesh</i> di Dekat <i>Puddle</i> Savonius.....	30
Gambar 4.5 <i>Mesh</i> di Dekat Profil NACA	30
Gambar 4.6 Pengaruh Ukuran <i>Time Step</i> terhadap Koefisien Torsi	33
Gambar 4.7 Pengaruh Jumlah Maksimum Iterasi terhadap Koefisien Torsi.....	34
Gambar 4.8 Pengaruh Jumlah <i>Grid</i> atau <i>Mesh</i> terhadap Koefisien Torsi	35
Gambar 4.9 Koefisien Torsi sebagai Fungsi <i>Speed Ratio</i> untuk Turbin Model A	37
Gambar 4.10 Koefisien Daya sebagai Fungsi <i>Speed Ratio</i> untuk Turbin model A	38
Gambar 4.11 Koefisien Torsi sebagai Fungsi <i>Speed Ratio</i> untuk Turbin Model B	39
Gambar 4.12 Koefisien Daya sebagai Fungsi <i>Speed Ratio</i> untuk Turbin Model B	39

Gambar 4.13 Perbandingan Nilai Koefisien Torsi Turbin Model A dan B, dengan Hasil Publikasi Eksperimen dan Turbin Savonius	40
Gambar 4.14 Perbandingan Nilai Koefisien Daya Turbin Model A dan B, dengan Hasil Publikasi Eksperimen dan Turbin Savonius	41
Gambar 4.15 Vektor Kecepatan Turbin Model A	42
Gambar 4.16 Vektor Kecepatan tubin model B	42
Gambar 4.17 Koefisien Toris dan Daya sebagai Fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> untuk Variasi Sudut <i>Pitch</i> Profil NACA	43
Gambar 4.18 Kontur <i>Static Pressure</i> pada Profil NACA 0018.....	45
Gambar 4.19 Potensi Energi Listrik per Bulan pada Tahun 2015.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Karakteristik Utama dari Simulasi Aliran.....	29
Tabel 4.2 Penentuan Kecepatan Sudut dan Total Waktu Simulasi.....	31
Tabel 4.3 <i>Courant Number</i> dan <i>Time Step Size</i>	32
Tabel 4.4 <i>Study</i> Pengaruh Ukuran <i>Time Step</i>	32
Tabel 4. 5 <i>Study Grid Independence</i>	35
Tabel 4.6 Model Numerik dan Detail <i>Solver</i>	36
Tabel 4.7 Nilai Torsi, Koef. Torsi dan Koef. Daya Turbin Model A	37
Tabel 4.8 Nilai Torsi, Koef. Torsi dan Koef Daya Turbin Model B.....	38

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan pada bab sebelumnya, hasil penelitian ini dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Turbin Darrieus-Savonius model A memiliki koefisien torsi maksimum 0,136 pada TSR 0,8 dan koefisien daya maksimum 0,109 pada TSR yang sama.
2. Turbin Darrieus-Savonius model B memiliki koefisien torsi maksimum 0,174 pada TSR 1,2 dan koefisien daya maksimum 0,256 pada TSR 1,6. Sehingga dapat disimpulkan bahwa turbin Darrieus-Savonius model B memiliki kinerja yang lebih baik dari model A
3. Hasil simulasi dari variasi sudut *pitch* profil NACA menunjukkan bahwa sudut 8° menghasilkan kinerja yang lebih pada turbin kombinasi Darrieus-Savonius.
4. Turbin Darrieus-Savonius model B memiliki kinerja 34% lebih baik dari turbin Savonius. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan profil NACA pada turbin Savonius dapat meningkatkan kinerja turbin tersebut.

5.2. Saran

Ada beberapa saran untuk dilakukan dalam penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Model turbulen yang digunakan dalam penelitian ini adalah *k- ω based SST*, disarankan untuk melakukan simulasi dengan model turbulen yang lain seperti *k- ϵ Realizable*. Hal ini dilakukan sebagai perbandingan hasil perhitungan.
2. Efek sudut *pitch* profil NACA telah dilakukan pada penelitian ini. Sedangkan profil yang dipilih NACA 0018. Saran yang bisa dilakukan

untuk penelitian selanjutnya adalah efek dari profil NACA yang lain, sehingga diperoleh profil NACA yang optimum.

3. *Software* yang digunakan untuk *generate mesh* pada penelitian ini adalah *Ansys Meshing*. Disarankan untuk menggunakan *software generate mesh* yang lain seperti Gambit. Sehingga diperoleh perbandingan waktu simulasi dan juga nilai solusi yang dicari.

DAFTAR PUSTAKA

- Abid, M. Karimov, K. S., Wajid, H. A., Farooq F, Ahmed H, Khan O. H. (2014), "Experimental Study of Darrieus-Savonius Water Turbine with Deflector: Effect of Deflector on the Performace". *Iranica Journal of Energi and Enviromental*, 6(1): 1-4, 2015.
- Ariadi, H. M. (2011), "Studi Numerik dan Eksperimental performansi turbin arus tipe vertikal aksis dengan variasi jumlah blade dan efek aspect ratio", Skripsi, ITS, Surabaya.
- Blackwell, B F., Sheldahl, R. E., Feltz, L. V. (1977), "Wind Tunnel Performance Data for Two and Three Bucket Savonius Rotor", *J. Energy*, Vol. 38, pp 141-149.
- Brian, K. dan Leo, L. (2008), "Variable Pitch Darrieus Water Turbines". *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 3, No. 3.
- Fraenkel, P. L. (2002), "Power from Marine Currents. Proc Instn Mech Engrs", *Part A: J Power and Energi*, Vol 216.
- Kurniawan, I. (2014), "Kajian Eksperimental dan Numerik Turbin air Helikal Gorlov untuk twist angle 60° dan 120°", *Jurnal Teknologi*, V (1) 2014: 7-13, ISSN: 2087-5428.
- Menet, J. L. (2004), "A Double-Step Savonius Rotor for Local Production Of Electricity: A Design Study", *Renew. Energy*, Vol. 29, pp 1843-1862.
- Malipeddi, A. R. dan Chatterjee, D. (2012), "Influence of Duct Geometri on The Performance of Darrieus Hydroturbine", *Journal of Renewable Energi*, No 43, Hal 292-300.
- Mohamed, M.H. Ali, A.H. dan Hafiz, A.A. (2015), "CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wint energy converter". *Engineering science and technology, an international journal*, 18(2015), 1-13.
- Ogawa, T. dan Yoshida, H. (1986), "The Effects of a Deflection Plate and Rotor End Plates on Performance of Savonius-Type Wind Turbine", *Bulletin of JSME. (In Japanese)*, Vol. 29, No. 253, pp 2115-2121.

- Sarma, N. K. Biswas, A. dan Misra, R. D. (2014), "Experimental and Computational Evaluation of Savonius Hydrokinetic Turbine for Low Velocity Condition with Comparison to Savonius Wind Turbine at The Same Input Power", *Journal of Energi conversion and Management*, No. 83, Hal. 88-98.
- Sahim, K. Ihtisan, K. Santoso, D. dan Sipahutar, R. (2014), "Experimental Study of Darrieus-Savonius Water Turbine with Deflector: Effect of Deflector on the Performance". *International Journal of Rotating Machinery*, Volume 2014, Article ID 203108, February 20, 2014.
- Bernad, S. Georgescu, A. Georgescu, S. C. Resida, R. S. dan Anton, I. (2008), "Flow Investigation in Achard Turbine", *The Publishing house of Romanian academy. Proceedings of Romanian academy, serie A*, Volume 9, number 2/2008, pp 000-000.
- Takasaki, K. Takao, M. dan Setoguchi, T. (2014), "Effect of Blade Shape on The Performance of Wells Turbine for Wave Energi Conversion", *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol: 8, No. 12.
- Versteeg, H K. dan Malalasekera, W. (2007), "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics*". Pearson Education Limited.
- Yaakob, O. Ahmed, Y. M, dan Ismail, M A. (2012), "Validation study for savonius vertical axis Marine Current turbine using CFD Simulation", *In: The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamic-APHydro2012*, September 3-4.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama Erifive Pranatal Sinaga. Lahir di kota Padangsidempuan, Sumatera Utara pada tanggal 15 Desember 1988. Penulis merupakan bungsu dari lima bersaudara lahir dari bapak bernama Binsar Hasiholan Sinaga dan mama bernama Helminaria Hutabarat. Menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri 21 Padangsidempuan lulus pada tahun 2001. Lulus SMP Negeri 1 Padangsidempuan pada tahun 2004 dan SMA Negeri 2 pada tahun 2007. Penulis melanjutkan sekolah ke pendidikan tinggi di Universitas Pattimura, Ambon dengan jurusan Teknik Perkapalan dan lulus sebagai Sarjana Teknik pada tahun 2013. Kemudian melanjutkan sekolah pascasarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dengan program beasiswa Pascasarjana Pra-S2 Sainstek 2013. Penulis diterima di Program Pascasarjana Fakultas Kelautan dengan bidang minat Teknik Sistem dan Pengendalian Kelautan.

Penulis memiliki minat untuk pengembangan energi terbarukan, untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Oleh karena itu topik tesis yang diambil oleh penulis adalah pemanfaatan energi terbarukan dari arus laut untuk digunakan sebagai sumber energi listrik.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi yang ramah lingkungan tanpa emisi gas buang merupakan isu yang terus dikembangkan belakangan ini. Jenis energi terbarukan antara lain pemanfaatan energi dari laut seperti energi gelombang, arus, pasang surut, dan termal; pemanfaatan energi surya; dan energi angin. Energi terbarukan ini dapat digunakan sebagai pembangkit listrik terutama untuk pulau-pulau kecil yang belum dilayani oleh perusahaan listrik negara.

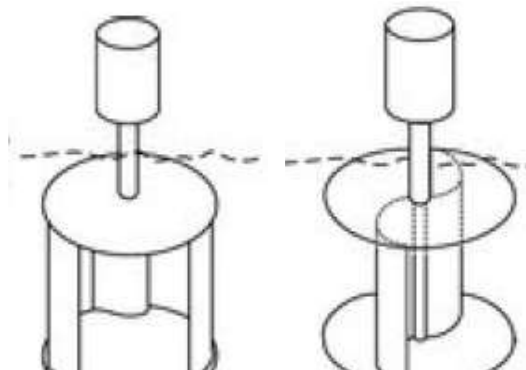
Oleh sebab itu, fokus penelitian ini adalah pemanfaatan arus laut untuk mengubah energi kinetik dari aliran air menjadi energi listrik. Alat yang digunakan adalah turbin air. Berdasarkan posisi sumbu porosnya turbin dibagi menjadi dua yaitu *horizontal axial water turbine* (HAWT) yaitu posisi sumbu putar turbin adalah horizontal dan *vertical axis water turbine* (VAWT) yaitu posisi sumbu putar turbin adalah vertikal.

Salah satu jenis turbin sumbu vertikal adalah turbin Darrieus. Penggunaan jenis turbin ini meningkat untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik. Kelemahan dari jenis turbin ini adalah variasi torsi *output* yang tinggi, dan sukar untuk *self starting* sehingga digunakan penggerak mula untuk awal putaran turbin. Oleh sebab itu, turbin ini kurang cocok diaplikasikan pada arus laut kecepatan rendah (Kurniawan, 2014). Tetapi turbin ini memiliki kelebihan yaitu mampu menghasilkan daya yang tinggi dan konstruksinya lebih mudah dan murah.

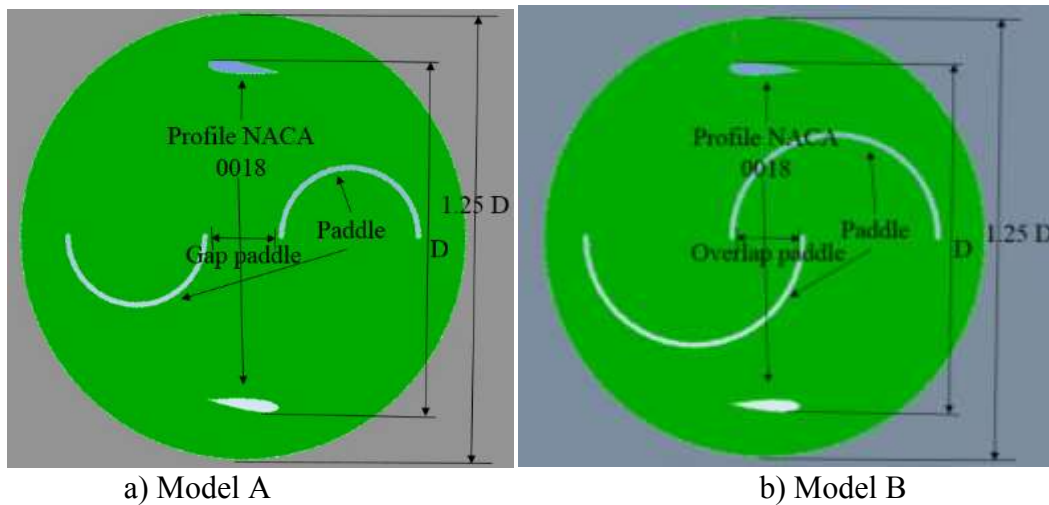
Jenis turbin sumbu vertikal yang lain adalah turbin Savonius. Turbin ini mampu berputar dengan kecepatan rendah. Sarma dkk (2014) melakukan penelitian tentang turbin Savonius untuk kecepatan 0,3 m/s sampai 0,9 m/s pada sebuah *open water channel*. Namun demikian, turbin ini memiliki efisiensi yang rendah dibandingkan dengan turbin vertikal lainnya (Yaakob dkk, 2012).

Dari penjelasan di atas maka dilakukan penelitian untuk mengkombinasikan kedua turbin tersebut. Sehingga diperoleh turbin kombinasi Darrieus-Savonius yang diasumsikan turbin ini dapat digunakan untuk arus laut kecepatan rendah dan juga mampu menghasilkan daya yang tinggi dari turbin Savonius.

Gambar 1.1 menunjukkan jenis turbin Darrieus dan turbin Savonius sedangkan Gambar 1.2 menunjukkan desain turbin kombinasi Darrieus-Savonius model A dan model B.



Gambar 1. 1 Turbin Darrieus dan turbin Savonius



Gambar 1. 2 Turbin Darrieus-Savonius

Pertimbangan pemilihan kedua model di atas adalah menempatkan profil NACA diantara *paddle*/sudu turbin Savonius, sehingga aliran air tidak terganggu. Turbin model A memiliki diameter *paddle* yang lebih kecil, sehingga ada jarak antara *paddle* yang akan ditempatkan profil NACA, sedangkan turbin model B memiliki *overlap paddle* yang akan ditempatkan profil NACA.

1.2. Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Berapa nilai koefisien torsi dan koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin Darrieus-Savonius model A.
2. Berapa nilai koefisien torsi dan koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin Darrieus-Savonius model B.
3. Berapa sudut *pitch* optimum profil NACA pada turbin Darrieus-Savonius.
4. Bagaimana kinerja turbin Darrieus-Savonius dibandingkan dengan turbin Savonius.

1.3. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan nilai koefisien torsi dan koefisien daya turbin Darrieus-Savonius model A.
2. Menentukan nilai koefisien torsi dan koefisien daya turbin Darrieus-Savonius model B.
3. Menentukan sudut *pitch* optimum profil NACA pada turbin Darrieus-Savonius.
4. Memperoleh nilai perbandingan antara turbin Darrieus-Savonius dengan turbin Savonius.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Profil *airfoil* yang digunakan adalah NACA 0018.

2. Panjang *chord* profil NACA adalah 400 mm.
3. Diameter turbin adalah 2 meter.
4. Diameter *paddle* Savonius model A adalah 800 mm dan 1200 mm untuk model B.
5. Simulasi CFD dilakukan dalam bentuk model dua dimensi dengan menggunakan *software ANSYS Fluent*.
6. Simulasi ini akan mengambil studi kasus di perairan sebelah barat Pulau Giliyang, Madura.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebuah desain turbin yang dapat dipertimbangkan untuk digunakan sebagai alat pembangkit tenaga listrik dari arus laut. Penggunaan turbin ini bisa aplikasikan di daerah kepulauan yang belum dilayani oleh perusahaan listrik negara dan juga berkarakteristik arus laut berkecepatan rendah.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini akan memaparkan ringkasan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya tentang turbin Darrieus, turbin Savonius dan juga tentang kombinasi turbin Darrieus-Savonius baik yang diaplikasikan sebagai turbin udara dan juga turbin air. Penelitian kombinasi turbin Darrieus-Savonius untuk aplikasi arus air, digunakan sebagai studi perbandingan dengan model turbin kombinasi pada penelitian ini.

Selain itu dalam bab ini juga dijelaskan dasar-dasar teori dasar untuk menyelesaikan penelitian ini seperti rumus turunan untuk mendapatkan energi dari arus, karakteristik *airfoil*, turbin sumbu vertical, dan matematis dari CFD.

2.1. Kajian Pustaka

Berikut ini adalah beberapa penelitian yang telah dilakukan tentang jenis-jenis turbin sumbu vertikal dan juga turbin kombinasi Darrieus-Savonius antara lain oleh Kurniawan (2014); Sarma, Biswas dkk (2014); Yaakob dkk (2012); Malipeddi, dan Chatterjee (2012); Abid dkk (2014); dan Sahim dkk (2014):

Kurniawan (2014) melakukan penelitian untuk pada turbin Gorlov. Turbin Gorlov merupakan penyempurnaan dari turbin Darrieus. *Blade* dari *airfoil* pada turbin Darrieus berbentuk lurus, sedangkan pada turbin Gorlov berbentuk helikal. Hasil simulasi numerik, koefisien daya turbin Gorlov pada *twist angle* 60° adalah 0,27 dan *twist angle* 120° adalah 0,31. Hasil pengujian eksperimen pada *twist angle* 60° adalah 0,10 dan *twist angle* 120° adalah 0,099. Hasil simulasi numerik lebih tinggi dari pengujian eksperimen karena dalam kajian numerik, model dari *blade* turbin tidak mengikuti kelengkungan garis edar dari turbin sehingga pada sudut *azimuth* 0° dan 180° koefisien *lift*-nya nol.

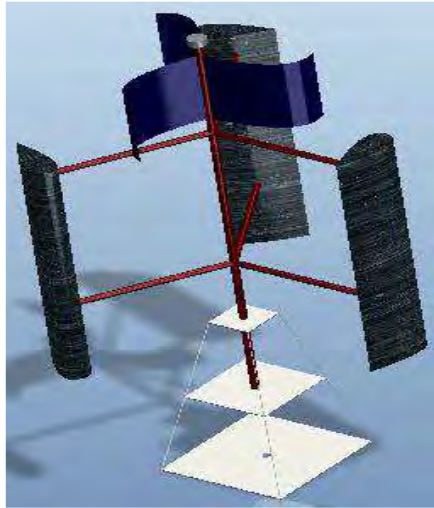
Sarma dkk (2014) melakukan penelitian pada turbin konvensional Savonius yang diaplikasikan pada arus laut pada kecepatan 0,3 sampai 0,9 m/s pada sebuah *open*

water channel. Selain itu dilakukan juga studi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) pada turbin. Hasil ini akan dibandingkan dengan turbin yang sama yang diaplikasikan pada udara. Menunjukkan bahwa aplikasi pada air lebih baik. Hal ini dikarenakan air memiliki berat jenis yang lebih tinggi, dan momentum yang lebih tinggi dari udara.

Yaakob dkk (2012) melakukan penelitian pada turbin Savonius yang digunakan pada arus laut kecepatan rendah. Simulasi dilakukan pada kecepatan arus laut terendah di perairan Malaysia 0,56 m/s. Variasi *Tip Speed Ratio* (TSP) dari 0,2 sampai 1,4 dengan *aspect ratio* 1,1 dan koefisien daya maksimum yang diperoleh adalah 0,275 pada TSP 0,7 dan *aspect ratio* dan hasil ini divalidasi dengan hasil eksperimen penelitian sebelumnya.

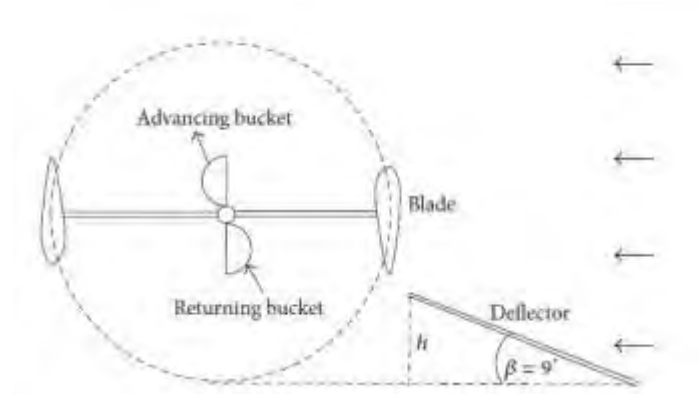
Malipeddi dan Chatterjee (2012) melakukan penelitian untuk mendesain sebuah *ducting* (saluran) yang akan dipasang pada turbin Darrieus yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja turbin *hydorkinetic*. Hasil dari penggunaan *duct* tersebut adalah pada nilai TSP 2 mampu mengurangi torsi *ripple* dengan faktor 4,15 dan koefisien daya meningkat menjadi 0,63 dari 0,4. Parameter yang diperhatikan dalam mendesain geometri sebuah *duct* adalah posisi *duct* pada turbin, sudut konvergensi *duct*, dan bentuk eksternal *duct*.

Abid, dkk (2014) melakukan penelitian tentang kombinasi turbin angin Savonius dan turbin Darrieus untuk menyempurnakan kekurangan dari turbin Darrieus yakni tidak bisa *self-starting* pada kecepatan angin yang rendah. Desain turbin tersebut adalah turbin Darrieus dengan tiga *blade*, sedangkan turbin Savonius diletakkan di atas turbin Darrieus seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Diameter turbin 1,25 m dan tinggi turbin 0,9 m. Simulasi eksperimen dilakukan pada kecepatan angin dari 3 m/s sampai 20 m/s. Daya yang diperoleh adalah 50 watt pada kecepatan 6 m/s.



Gambar 2.1 Model Turbin Kombinasi Darrieus-Savonius Penelitian Abid dkk (2014)

Sahim dkk, (2014) melakukan penelitian pada kombinasi turbin air Darrieus dan Savonius. Simulasi dilakukan dengan tiga kondisi, yakni hanya turbin Darrieus, kombinasi turbin Darrieus-Savonius tanpa *deflector* dan kombinasi turbin Darrieus-Savonius dengan *deflector*. Desain dari turbin kombinasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.2. Tempat simulasi dilakukan di saluran irigasi. Disimpulkan bahwa kombinasi turbin dengan *deflector* meningkatkan kinerja turbin, yakni koefisien torsi dan koefisien daya yang meningkat. Koefisien torsi pada turbin Darrieus adalah 0,133 pada TSR 1,06, sedangkan turbin Darrieus-Savonius dengan $Ar = 2,5$ memiliki koefisien torsi 0,126 pada TSR = 0,88.



Gambar 2.2 .Model Turbin Kombinasi Darrieus-Savonius Penelitian Sahim dkk, (2014)

2.2. Dasar Teori

Beberapa dasar teori untuk menyelesaikan penelitian ini antara lain, energi dari arus air, karakteristik aerodinamika *airfoil*, turbin sumbu vertikal, dan matematika CFD.

2.2.1. Energi dari Arus Air

Dalam fisika energi kinetik dapat ditunjukkan dengan rumus berikut, (Bernad dkk, 2008):

$$E_K = \frac{1}{2} m. v^2 \quad (2.1)$$

dan, dalam fluida dinamik, dikenal massa rata-rata aliran udara (\dot{m}) dengan densitas (ρ) melalui sebuah permukaan luasan (A), daya fluida dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$P_{avail} = \frac{1}{2} \dot{m}. v^2$$

atau,

$$P_{avail} = \frac{1}{2} \rho. A v^3 \quad (2.3)$$

dimana $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$ [kg/s], ρ = densitas [kg/m³], A = luas penampang [m²], v = kecepatan fluida [m/s].

Persamaan di atas menunjukkan daya maksimal yang dihasilkan dalam aliran fluida. Oleh sebab itu, persamaan tersebut menggambarkan daya dari air yang terjadi pada sebuah turbin dengan luas rotor *swept* (A_r), densitas air dan kecepatan air. Sedangkan persamaan ini juga digunakan untuk menentukan daya yang ditangkap oleh turbin. Nilai ini adalah sebuah fungsi turunan antara kecepatan air *upstream* (V_i) dan *downstream* (V_0), yang ditunjukkan pada rumus berikut (Bernad dkk, 2008):

$$P_0 = \frac{1}{2} \dot{m}(V_i^2 - V_0^2) \quad (2.4)$$

Selain itu, diasumsikan kecepatan fluida diskontinuis pada penampang vertikal turbin, massa rata-rata aliran melalui turbin dapat diperkirakan sebagai berikut (Bernad dkk 2008):

$$\dot{m} = \rho \cdot A_r \cdot \left(\frac{V_i + V_0}{2} \right) \quad (2.5)$$

dan, hasil substitusi persamaan di atas untuk daya maksimum yang dapat diekstraksikan dari fluida dalam hubungannya dengan kecepatan fluida *upstream* saja (Bernad dkk, 2008):

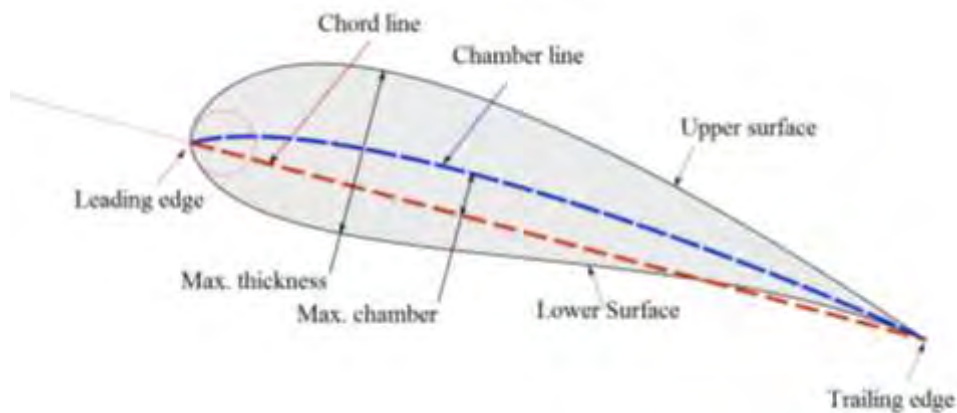
$$P_{maks} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A_r \cdot V_i^3 \quad (2.6)$$

Dimana C_p adalah koefisien daya yang tergantung pada perbandingan kecepatan fluida *downstream* terhadap *upstream* (V_0/V_i) dan memiliki nilai maksimum secara teori adalah 16/27 atau 0,59 berdasarkan pada Betz Limit. Oleh karena efisiensi daya tertinggi turbin baik dua atau tiga blade adalah lebih kecil dari 0,50 maka daya rotor memiliki batas efektif yang ditunjukkan sebagai berikut (Bernad dkk, 2008):

$$P_{limit} = \frac{1}{4} \rho \cdot A_r \cdot V_i^3 \quad (2.7)$$

2.2.2. Karakteristik Aerodinamika *Airfoil*

Airfoil adalah salah satu bentuk *body* aerodinamika sederhana yang berguna untuk memberikan gaya angkat tertentu terhadap suatu *body* lainnya dan dengan bantuan penyelesaian matematis sangat memungkinkan untuk memprediksi berapa besarnya gaya angkat tersebut. *Airfoil* digunakan untuk turbin Darrieus, turbin Well dll.

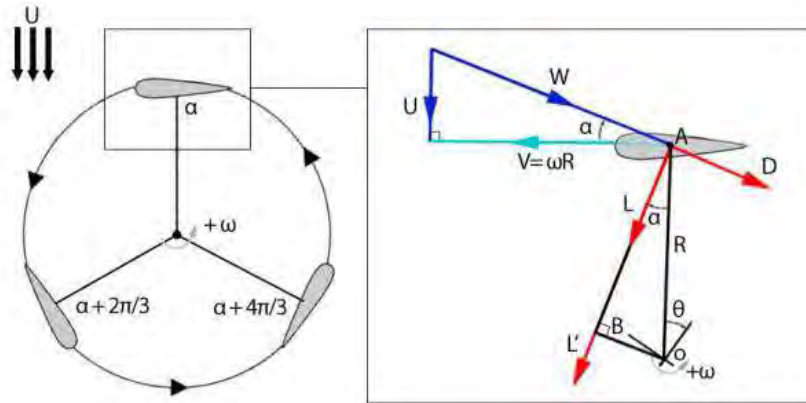


Gambar 2.3 Nomenklatur *Airfoil*

Airfoil yang bila dialiri udara dengan arah sejajar dengan tali busur (*chord*)-nya, tidak akan menghasilkan gaya tarik disebut dengan *airfoil* simetris. *Airfoil* simetris hanya akan menghasilkan gaya angkat bila aliran udara yang melewatinya membentuk sudut tajam dengan tali busur. Sedangkan *airfoil* yang tidak simetris menghasilkan gaya angkat sekalipun arah aliran yang melewatinya sejajar dengan tali busur. Gaya angkat yang timbul karena adanya perbedaan tekanan udara antara atas dan bawah *airfoil*, sehingga tekanan atas lebih besar dari tekanan di bawah. Nomenklatur *airfoil* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Sudut serang adalah sudut yang dibentuk oleh tali busur sebuah *airfoil* dan arah aliran fluida yang melewatinya/*relative flow* (w). Biasanya diberi tanda α . Untuk *airfoil* simetris, besar gaya *lift* (L) yang dihasilkan akan nol bila sudut serang-nya nol, sedangkan pada *airfoil* tidak simetris sekalipun sudut serangnya nol tetapi gaya angkat tetap timbul. Gaya angkat menjadi nol bila *airfoil* tidak simetris membentuk sudut

negatif terhadap aliran udara. Sudut serang dimana gaya angkat sama dengan nol ini disebut *zero angle lift*.



Ada dua jenis sudut serang yang terdapat pada airfoil yaitu: sudut serang mutlak dan sudut serang kritis. Sudut serang mutlak adalah sudut serang sebuah airfoil diukur dari kedudukan zero angle lift. Sudut serang kritis adalah sudut serang dimana gaya angkat/*lift* yang dihasilkan akan mencapai maksimum, diatas sudut tersebut gaya angkat akan menurun dan gaya hambat/*drag* akan membesar dengan cepat, posisi ini disebut juga dengan posisi *stall*. Definisi dari gaya angkat dan sudut serang dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut ini.

Gambar 2.4 Diagram Bebas dari Vektor Gaya, Kecepatan dan Sudut Serang pada *Blade* Turbin Darrieus

2.2.3. Turbin Sumbu Vertikal

Pada umumnya turbin sumbu vertikal dibagi menjadi tiga jenis yaitu (1) tipe Savonius (2) tipe Darrieus dan (3) tipe H-Rotor. Yang akan dipaparkan pada penelitian ini adalah turbin Savonius dan Turbin Darrieus.

Turbin Darrieus

Turbin air Darrieus ini diadopsi dari turbin Darrieus untuk angin. Nama turbin ini diambil dari G. J. M Darrieus yang menemukan turbin angin pada tahun 1926. Keunggulan turbin ini adalah:

- Bisa dibuat dengan diameter yang lebih besar dibandingkan dengan kedalamannya, sehingga dapat menyerap aliran air yang lebih besar sehingga menghasilkan daya yang lebih besar.
- Porosnya vertikal memudahkan dalam perawatan dimana bantalan dan generatornya ditempatkan di atas permukaan air.

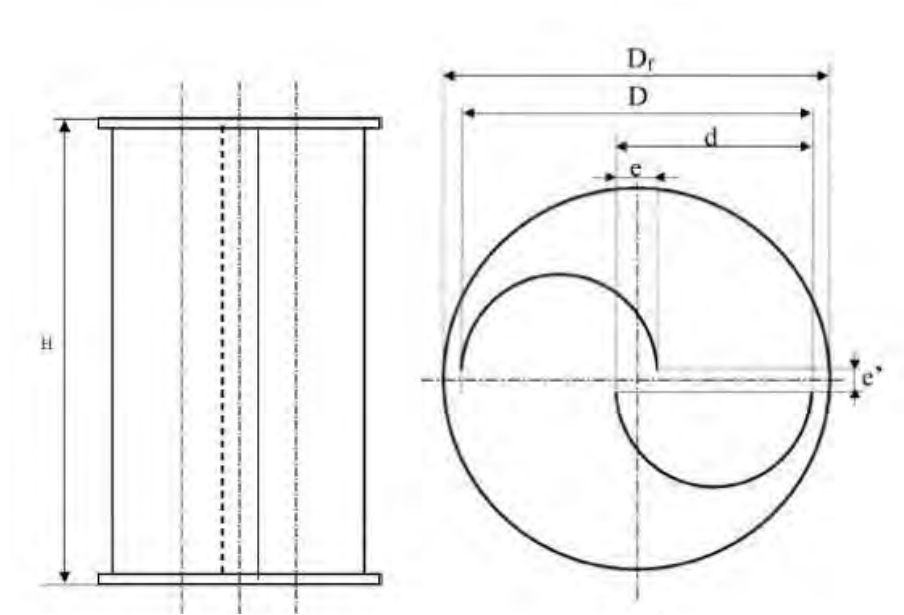
Kelemahan turbin ini selain tidak bisa *self starting* pada kecepatan arus rendah, dan vibrasi yang cukup besar jika kecepatan aliran tinggi.

Pada awalnya turbin Darrieus memiliki *aspect ratio* (perbandingan antara tinggi dan diameter turbin) yang rendah, hal ini bertujuan untuk mengurangi panjang *blade* dan volume central sehingga secara otomatis juga mengurangi area tersampu. Penambahan *aspect ratio* adalah cara lain untuk menambah ketinggian rotor dan untuk menangkap lebih banyak energi.

Untuk meningkatkan performa turbin Darrieus bisa juga dilakukan variabel *pitch blade*. Hal ini untuk membuat sudut serang blade pada posisi yang optimal sehingga menghasilkan daya angkat yang besar. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi *pitch blade* pada turbin Darrieus meningkatkan performa dari pada turbin yang memiliki *fixed pitch blade*. Selain itu penggunaan variabel pitch juga menghasilkan torsi awal/*starting torque* yang besar.

Turbin Savonius

Sama seperti turbin Darrieus, turbin air Savonius juga diadopsi dari turbin Savonius dari angin. Rotor Savonius ditemukan oleh Sirgurd Johannes Savonius pada tahun 1922. Turbin ini berbentuk huruf S bila dilihat dari atas.



(a) Tampak Samping (b) Tampak Atas

Gambar 2.5 Skema *Paddle* Savonius

Gambar 2.5 di atas, *aspek ratio*, $a.s$ dapat didefinisikan seperti persamaan 2.8, (Yaakob dkk, 2012):

$$a.s = \frac{H}{d} \quad (2.8)$$

Dimana H dan d adalah tinggi rotor dan diameter *paddle*.

Parameter lain yang penting dari turbin Savonius adalah *overlap ratio* yang didefinisikan pada persamaan 2.9 (Yaakob dkk, 2012):

$$\kappa = \frac{e}{d} \quad (2.9)$$

Dimana κ adalah *overlap ratio* dan e adalah ukuran overlap pada rotor. Kinerja koefisien dari turbin Savonius meningkat pada *overlap ratio*-nya 0,10 sampai 0,15 seperti yang telah diteliti oleh Blackwell (1977) sedangkan akan mengalami penurunan ketika *overlap ratio* lebih kecil dari 0,10 dan lebih besar dari 0,3. *Ranges* antara 0,15 sampai 0,30; hasil penelitian oleh Menet (2004) diperoleh bahwa kinerja optimum adalah *overlap ratio* berada dalam range dari 0,20-0,25.

2.2.4. Kinerja dari Turbin

Tip speed ratio λ atau disingkat TSR untuk turbin udara (turbin arus laut dalam penelitian ini) adalah perbandingan antara kecepatan sudut pada *tip blade* dan kecepatan air sebenarnya. *Tip speed ratio* didefinisikan pada persamaan 2.10 (Yaakob dkk, 2012):

$$\lambda = \frac{\omega D}{2U} \quad (2.10)$$

Kecepatan air masuk U mewakili torsi mekanik T dan daya mekanik P didefinisikan oleh luas *swept* A_s (perkalian antara tinggi rotor Savonius H dan diameter D). Sehingga koefisien torsi dan koefisien daya didefinisikan pada persamaan 2.11 dan persamaan 2.12 berikut (Yaakob dkk, 2012):

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_s D U^2} \quad (2.11)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_s U^3} \quad (2.12)$$

dimana C_m dan C_p adalah koefisien torsi dan koefisien daya. Kinerja turbin akan diukur menggunakan parameter ini.

2.2.5. CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah *tool* berbasis komputer untuk mensimulasikan perilaku suatu sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan proses fisik lainnya. Cara kerjanya dengan memecahkan persamaan-persamaan aliran fluida (dalam bentuk tertentu) meliputi suatu daerah yang diinginkan, dengan kondisi pada batas-batas daerah tersebut adalah spesifik dan diketahui.

Kumpulan persamaan yang menggambarkan proses-proses momentum-momentum, transfer massa dan transfer panas dikenal sebagai persamaan Navier Stokes. Persamaan ini merupakan persamaan parsial differensial dan diturunkan pada awal abad ke-19 oleh Sir George Stokes seorang ilmuwan berkebangsaan Inggris dan Henry Navier berkebangsaan Prancis. Solusi analitik umum dari persamaan ini tidak diketahui namun persamaan ini dapat didiskritkan dan dipecahkan secara numerik.

Persamaan-persamaan yang menggambarkan proses lain seperti pembakaran dapat dipecahkan dengan persamaan Navier Stokes. Model aproksimasi sering digunakan untuk menurunkan persamaan tambahan ini, model turbulensi adalah salah satu contohnya.

Ada beberapa jumlah metode solusi yang digunakan untuk kode CFD. Metode solusi yang paling banyak digunakan juga untuk ANSYS *Fluent* adalah teknik volume hingga (*finite volume*). Dalam teknik ini daerah analisis dibagi dalam beberapa sub daerah yang disebut volume atur (*control volume*). Persamaan atur lalu didiskritkan dan dipecahkan secara iterasi untuk setiap volume atur. Hasilnya adalah aproksimasi dari nilai setiap variabel pada titik tertentu dalam domain. Dengan cara ini didapatkan gambaran penuh perilaku aliran yang diinginkan.

Kode-kode CFD disusun dalam struktur suatu algoritma numerik yang dapat menangani masalah fluida. Ada tiga tahapan utama dalam melakukan simulasi CFD yaitu:

- a. *Pre Processor*
- b. *Solver*
- c. *Post Processor*

a. *Pre Processor*

Pre processor mengandung *input* dari masalah fluida. Beberapa kegiatan yang masuk dalam bagian ini adalah:

- Pendefinisian dari geometri daerah kajian dan domain komputasi.

- *Grid generation* yaitu pembagian domain ke domain-domain yang lebih kecil yaitu *grid* atau *mesh* dari elemen-elemen kecil (*cells*).
- Pemilihan fenomena fisik dan kimia dari masalah yang dimodelkan.
- Pendefinisian properti fluida.
- Spesifikasi kondisi batas yang sesuai pada *cell* yang bersinggungan dengan batas domain.

Solusi dari masalah fluida didefinisikan pada titik di dalam tiap *cell*. Akurasi solusi CFD diatur oleh banyaknya jumlah *cell* dalam *grid*. Secara umum semakin besar jumlah *cell* maka akurasi dari solusi yang dihasilkan menjadi lebih baik. Semakin banyak jumlah *grid* maka akurasi biaya komputasi juga semakin besar.

Oleh karena itu *grid* yang optimal memiliki *mesh* yang tidak seragam, dengan *mesh* yang halus di area yang terjadi perubahan dari titik satu ke titik lain dan *mesh* yang lebih kasar di area dengan perubahan *property relative* sedikit. Kemampuan yang juga dikembangkan adalah *self-adaptive meshing* yaitu kemampuan memperhalus *grid* di daerah dengan variasi properti tinggi. Secara umum terdapat dua bagian yang dominan di tahap *Pre Processor* ini yaitu definisi geometri dari domain dan *grid generation*.

b. Solver

Terdapat beberapa teknik utama dalam mencari solusi numerik yaitu *finite difference*, *finite element* dan *spectral method*. Secara garis besar metode numerik yang menjadi dasar dari *solver* melakukan hal-hal sebagai berikut:

1. Aproksimasi dari aliran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi-fungsi sederhana.
2. Diskritisasi dengan melakukan substitusi dari aproksimasi tersebut ke persamaan-persamaan atur aliran dan dilanjutkan dengan manipulasi matematis.
3. Solusi dari persamaan aljabar.

Metode lain dikembangkan dari ketiga metode tersebut, salah satunya metode volume hingga (*finite volume*). Metode ini merupakan pengembangan dari metode *finite difference* yang memiliki formulasi khusus. Algoritma numeriknya mengandung langkah sebagai berikut:

- Integrasi dari persamaan atur dari fluida sepanjang semua volume atur dari domain.
- Diskritisasi yang melibatkan substitusi dari berbagai macam aproksimasi *finite difference* ke persamaan yang diintegrasikan. Sehingga persamaan integral diubah menjadi persamaan aljabar.
- Solusi dari persamaan aljabar dengan metode iteratif.

Langkah pertama yaitu pengintegrasian volume atur membedakan metode ini dari semua teknik CFD. Konservasi dari variabel aliran ϕ seperti kecepatan atau entalpi dalam volume atur yang berhingga dapat dinyatakan sebagai keseimbangan antara macam proses yang menambah maupun mengurangnya.

Secara lebih jelasnya dapat dinyatakan:

$$\begin{aligned}
 \left[\begin{array}{l} \text{Laju perubahan} \\ \text{dari } \phi \text{ di volume} \\ \text{atur sepanjang waktu} \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{l} \text{Fluks netto dari } \phi \\ \text{ke dalam volume atur} \\ \text{karena konveksi} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Fluks netto } \phi \text{ ke dalam} \\ \text{volume atur karena} \\ \text{difusi} \end{array} \right] \\
 &+ \left[\begin{array}{l} \text{Laju pembentukan } \phi \text{ di} \\ \text{dalam volume atur} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Kode-kode CFD mengandung teknik diskritisasi yang cocok untuk menangani fenomena *key transport*, konveksi (transport karena aliran fluida), dan difusi (transport karena variasi ϕ dari titik ke titik) dan juga *source* (terjadinya dan hilangnya ϕ) dan laju perubahan terhadap waktu.

Perangkat lunak CFD yang digunakan adalah ANSYS *Fluent*. Satu set persamaan yang dipecahkan oleh ANSYS *Fluent* yaitu persamaan *unsteady* Navier Stokes dalam bentuk konservasi.

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.13)$$

Persamaan momentum:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot \left(-\rho \delta + \mu (\nabla U + (\nabla U)^T) \right) + S_M \quad (2.14)$$

Persamaan energi:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (2.15)$$

h_{tot} didefinisikan sebagai *specific total enthalpy*. Untuk kasus dari properti variabel dan aliran kompresibel dapat dinyatakan dalam *specific static enthalpy* h :

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2$$

dimana:

$$h_{tot} = h(p, T) \quad (2.17)$$

Bila kerja *viscous* tidak dapat diabaikan maka persamaan ditambahkan di sisi kanan persamaan energi di atas sehingga memperhitungkan efek dari *viscous shear*.

Persamaan energi menjadi:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot \left(\mu \nabla U + \nabla U^T - \frac{2}{3\nabla} \cdot U \delta U \right) + S_E \quad (2.18)$$

Dari persamaan 2.13 sampai 2.17 di atas dapat diketahui bahwa ada 7 variabel yang tidak diketahui yaitu u, v, w, P, T, ρ, h . Namun satu set persamaan di atas dapat dilengkapi dengan dua persamaan aljabar termodinamika yaitu *Equation of State* yang menghubungkan massa jenis dengan tekanan dan temperatur. Persamaan lain adalah *Constitutive Equation* yang menghubungkan *enthalpy* dengan temperatur dan tekanan.

Apabila kontribusi energi terhadap energi total dapat diabaikan maka persamaan energi dapat disederhanakan menjadi *Thermal Energi Equation*:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \Delta T) + S_E$$

Equation of state

Solver di ANSYS *Fluent* menghitung tekanan dan *enthalpy* statis. Untuk mencari massa jenis kita harus memiliki *thermal equation of state* dan untuk mencari temperatur kita harus memiliki hubungan konstitutif. Pemilihan kedua hubungan ini tidak harus independen dan merupakan pilihan memodelkan.

Thermal equation of state digambarkan sebagai fungsi temperatur dan tekanan.

$$\rho = \rho(p, T) \quad (2.20)$$

Specific heat capacity c_p dinyatakan sebagai temperatur dan tekanan.

$$c_p = c_p(p, T) \quad (2.21)$$

Untuk gas ideal, massa jenis dinyatakan dengan Hukum Gas Ideal dan dalam kasus ini c_p dapat menjadi fungsi temperatur saja.

$$c_p = c_p(T) \quad (2.22)$$

Untuk gas ideal, hubungan variabelnya dapat dinyatakan oleh hukum Gas Ideal, Blackwell B. F. (1977):

$$\rho = \frac{w(p + p_{ref})}{R_0 T} \quad (2.23)$$

Dimana w adalah massa molekul dari gas dan R_0 adalah konstanta gas universal.

Persamaan transport

Selain itu ada beberapa persamaan untuk variabel tambahan seperti persamaan *transport*. Bentuk umum persamaan transport untuk variabel tambahan (*non-reacting scalar*) dengan adanya turbulensi adalah Blackwell B. F. (1977):

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (U \Phi) \right) = \nabla \cdot \left(\left(\rho D_\Phi + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \cdot \left(\frac{\Phi}{\rho} \right) \right) + S_\Phi \quad (2.24)$$

Dimana:

ρ adalah massa jenis

ϕ adalah kuantitas per unit volume (konsentrasi)

ϕ/ρ adalah kuantitas per unit massa

S_ϕ adalah *volumetric source* yaitu kuantitas per unit volume per unit waktu

D_ϕ adalah *kinematic diffusivity*

μ_t adalah viskositas turbulensi dengan Sc_t adalah bilangan turbulensi Schmidt

c. Post Processor

Bagian ini mengandung kemampuan grafis yang dibutuhkan untuk menampilkan hasil termasuk kemampuan visual yang lain seperti animasi. Hal ini yang juga termasuk adalah *display grid* dan domain geometri, plot vector, plot kontur, plot permukaan 2D atau 3D, *particle tracking*, animasi dan lain sebagainya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Langkah – langkah sistematis yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian ini adalah:

3.1. Identifikasi dan Perumusan Masalah

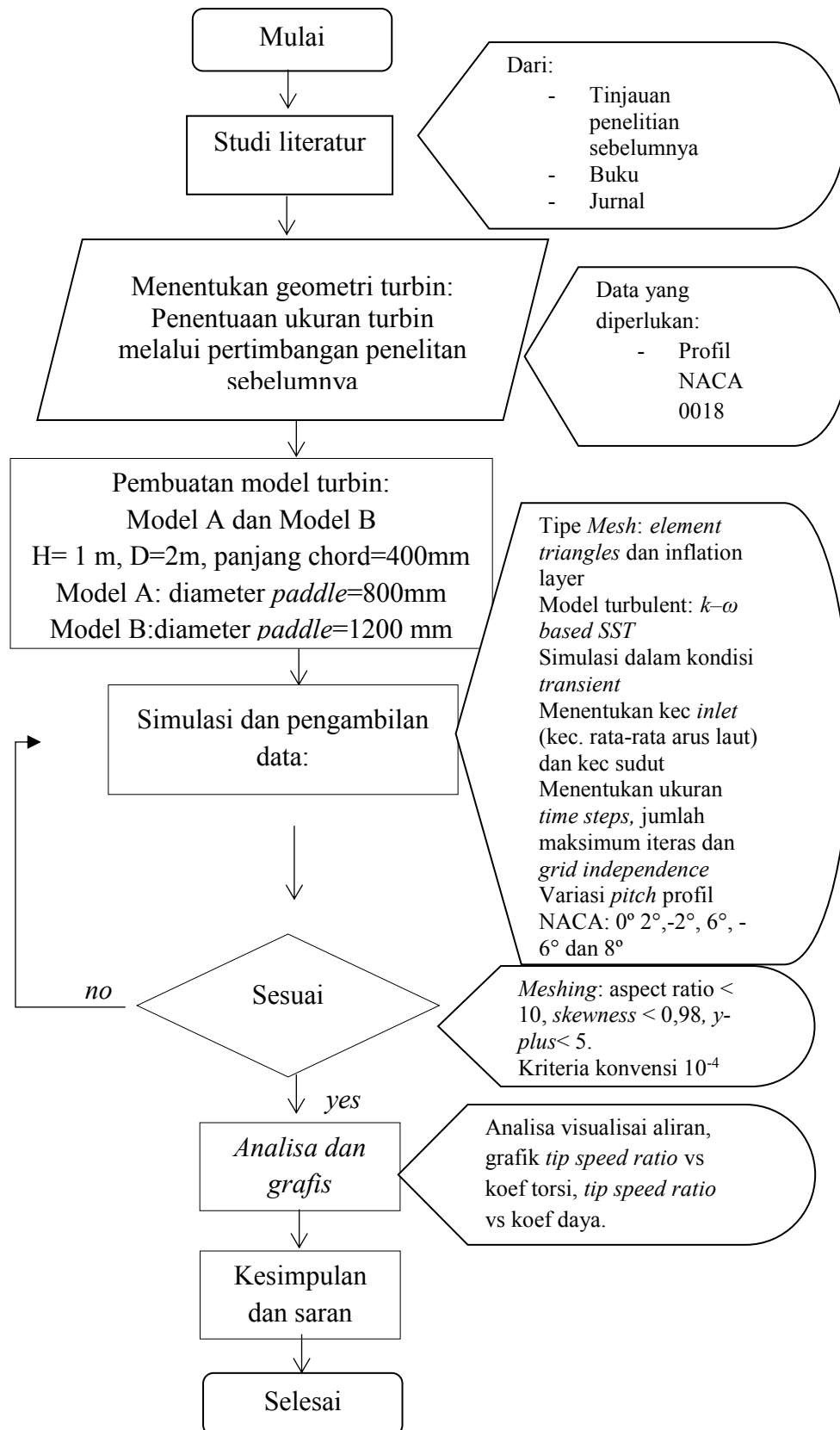
Melakukan kombinasi antara turbin Darrieus dan turbin Savonius untuk memperoleh turbin kombinasi Darrieus-Savonius yang memiliki kinerja lebih baik. Sehingga turbin ini dapat digunakan sebagai pembangkit listrik pada arus laut kecepatan rendah.

3.2. Objek Penelitian

Objek penelitian adalah turbin kombinasi yakni turbin Darrieus-Savonius.

3.3. Diagram Alur Penelitian

Diagram alur penelitian studi numerik turbin Darrieus-Savonius untuk konversi energi arus laut kecepatan rendah dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

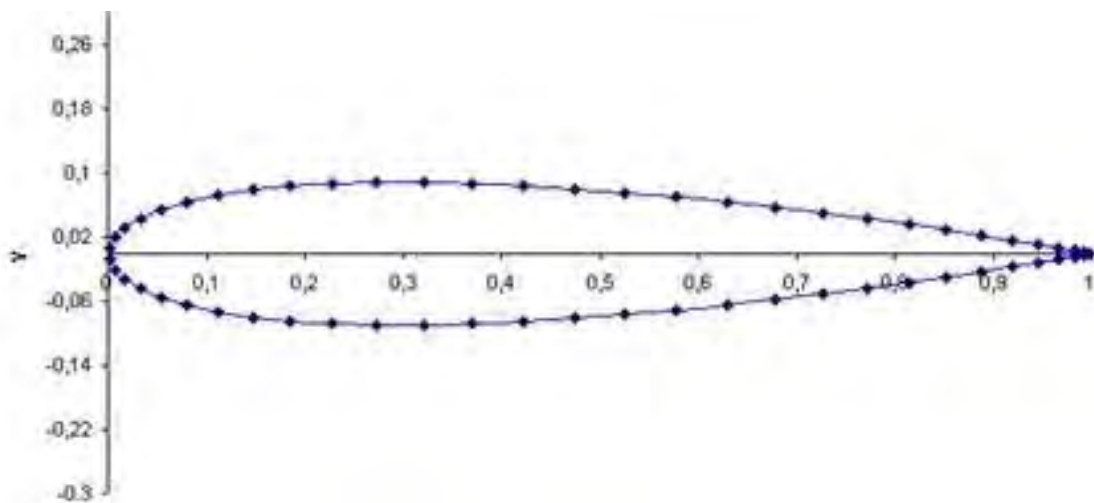
3.4. Studi Literatur

Studi literatur diperoleh dari penelitian-penelitian terdahulu tentang turbin Darrieus, turbin Savonius dan turbin lainnya yang telah dimuat dalam beberapa jurnal. Dari jurnal-jurnal tersebut diperoleh teori-teori dasar untuk mengetahui cara menyelesaikan permasalahan dalam penelitian ini, seperti istilah dan pengertiannya, rumus-rumus dasar untuk menghitung torsi dan daya pada turbin. Studi literatur juga diperoleh dari tugas akhir mahasiswa, buku-buku serta tutorial-tutorial *software* ANSYS *Fluent* yang mendukung penyelesaian penelitian ini.

3.5. Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan antara lain koordinat profil *airfoil* NACA 0018 dan data kecepatan arus laut di sekitar Pulau Giliyang, Madura (diperoleh dari BMKG Surabaya).

Panjang *chord* profil 400 mm untuk masing-masing model. Profil NACA 0018 dapat dilihat pada gambar 3.2.

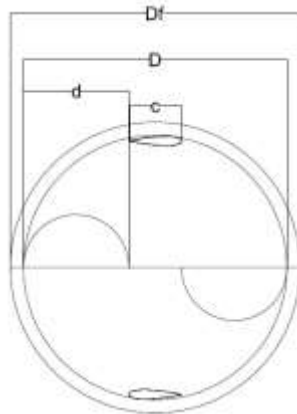


Gambar 3.2 Koordinat x/c Profil NACA 0018

3.6. Penentuan Ukuran dan Pembuatan Geometri Turbin

Gambar 3.3 dan 3.4 di bawah ini adalah model turbin Darrieus-Savonius.

- Model model A



Gambar 3.3 Turbin Darrieus Savonius Model A

Model A memiliki diameter *paddle* yang lebih kecil sehingga ada jarak diantara kedua *paddle* yang akan diletakkan profil NACA.

Keterangan gambar:

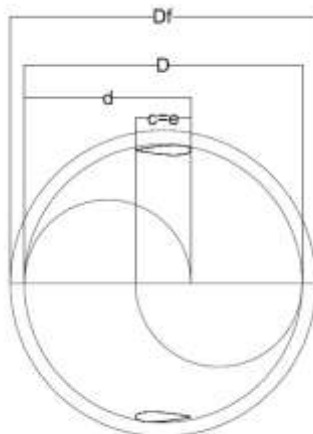
Df - panjang *rotating domain*, 2500 mm

D - diameter rotor, 2000 meter.

d - diameter *paddle*, 800 mm.

c - panjang chord dari *airfoil* NACA 0018, 400 mm.

- Model kedua B



Gambar 3.4 Turbin Darrieus Savonius Model B

Model B memiliki ukuran yang sama dengan model A, hanya turbin model B memiliki nilai e atau disebut *overlap paddle*. Di depan *overlap paddle* Savonius,

diletakkan profil NACA 0018 seperti yang terlihat pada gambar 12, sehingga ukuran e sama dengan ukuran panjang *chord airfoil*, c . Nilai $e = c$ adalah 400 mm. Diameter *paddle* adalah 1200 mm. *Overlap ratio*, β adalah perbandingan nilai e dengan diameter *paddle*, maka nilai β adalah 0,33.

Pembuatan model turbin untuk simulasi ini menggunakan *software AUTOCAD*. Ukuran yang dipaparkan di atas adalah ukuran skala penuh, karena kelebihan metode numerik adalah kemampuan untuk melakukan simulasi dengan skala penuh.

3.7. Simulasi dan Pengambilan Data

Setelah menentukan model turbin, tahap selanjutnya adalah simulasi numerik dengan menggunakan *software ANSYS Fluent*. Semua simulasi dilakukan dengan kecepatan konstan yakni 0,269 m/s. Kecepatan ini adalah kecepatan rata-rata arus laut selama tahun 2014-2015 yang diukur di bagian barat Pulau Giliyang, Madura

Mesh

Pembuat *mesh* pada model menggunakan *software ANSYS mesh*, tipe *mesh* yang akan digunakan adalah element *triangles*. Ada beberapa kriteria kualitas *mesh* yang harus dipenuhi untuk melakukan simulasi antara lain *aspect ratio* < 10 , dan *skewness* $< 0,98$. Kualitas *mesh* yang baik akan meningkatkan akurasi hasil simulasi dengan CFD.

Pre Processing

Pre Processing merupakan tempat dimana benda akan diberikan kondisi batas. Selain itu dilakukan juga pemilihan model turbulen. Model turbulen yang biasa digunakan dalam simulasi turbin adalah *Realizable $k - \epsilon$* dan *$k - \omega$ based SST*

Post processing

Post processing adalah tempat dimana hasil benda setelah dilakukan simulasi pada solver. Pada bagian ini nantinya dapat dilihat visualisasi aliran yang melewati turbin serta torsi yang dihasilkan oleh turbin tersebut.

Grid Independence

Studi *grid independence* menentukan ukuran *mesh* yang paling optimum dengan cara meningkatkan jumlah *mesh* sehingga tidak terjadi perubahan koefisien torsi melebihi 3%.

3.8. Analisa Data

Setelah dilakukan simulasi, maka data-data yang diperoleh dari hasil simulasi tersebut akan dibuat dalam bentuk grafik. Beberapa grafik yang akan ditambahkan adalah *tip speed ratio* vs koefisien torsi dan koefisien daya dan variasi sudut *pitch* profil NACA.

Hasil perhitungan tersebut akan dibandingkan hasil eksperimen turbin air kombinasi Darrieus-Savonius, Sahim dkk (2014) dan juga turbin Savonius yang memiliki ukuran yang sama dengan model B.

3.9. Kesimpulan dan Saran

Akhirnya, akan dibuat kesimpulan dan saran dari penelitian ini. Kesimpulan nanti akan menjawab permasalahan yang telah dipaparkan.

BAB 4

PEMBAHASAN

Beberapa bagain yang akan di bahas dalam bab ini antara lain, mengolah data kecepatan arus laut di sebelah barat Pulau Giliyang, Madura. Nilai kecepatan arus laut permukaan tersebut akan digunakan untuk nilai kecepatan *inlet* pada domain. Selanjutnya penentuan ukuran *domain* dan *boundary condition*. Simulasi yang digunakan adalah *undsteady condition/transient* sehingga dilakukan pemilihan ukuran *time steps* dan jumlah maksimum iterasi yang optimum dimana perubahan nilai koefisien torsi tidak lebih dari 5% untuk ukuran *time steps* dan 1% untuk jumlah maksimum iterasi. Demikian juga dilakukan *grid independence*, yakni peningkatan jumlah *grid/mesh* sampai tidak terjadi perubahan nilai koefisien torsi sebesar 3%. Hasil dari setiap simulasi adalah data koefisien torsi dan koefisien daya dari turbin kombinasi tersebut. Selanjutnya dilakukan studi efek dari sudut *pitch* profil NACA dan menghitung potensi energi listrik dari arus laut di sebelah barat Pulau Giliyang, Madura.

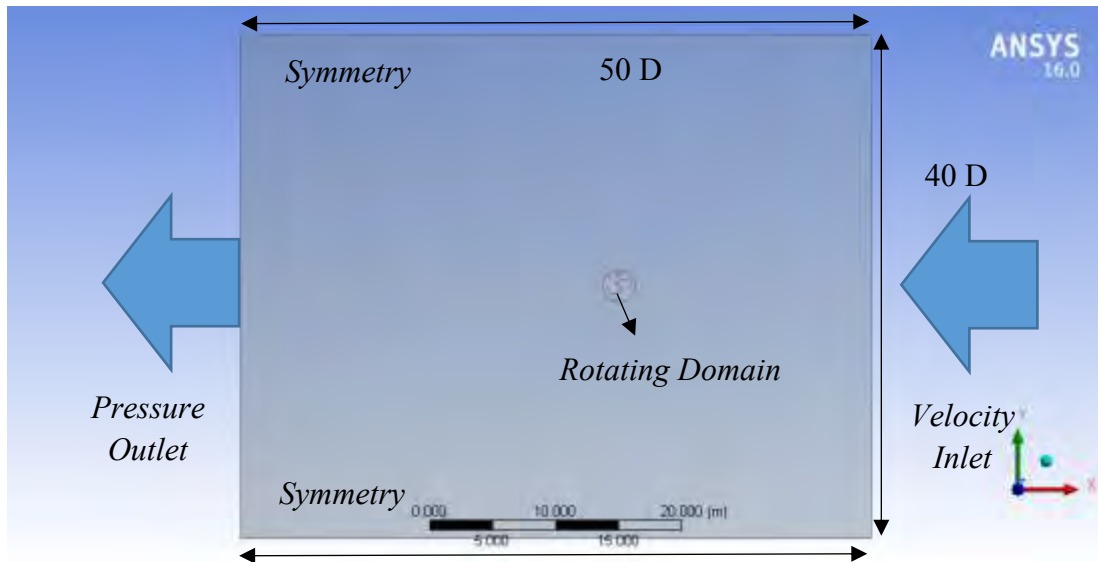
4.1. Data Kecepatan Arus Laut Permukaan di Sebelah Barat Pulau Giliyang

Data kecepatan arus laut permukaan ini diperoleh dari BMKG Surabaya. Periode data dari tahun 2014 – 2015. Dari data ini diperoleh kecepatan rata-rata arus laut, yakni 0,269 m/s. Nilai kecepatan ini akan masukan sebagai kecepatan *inlet* pada *boundary condition*.

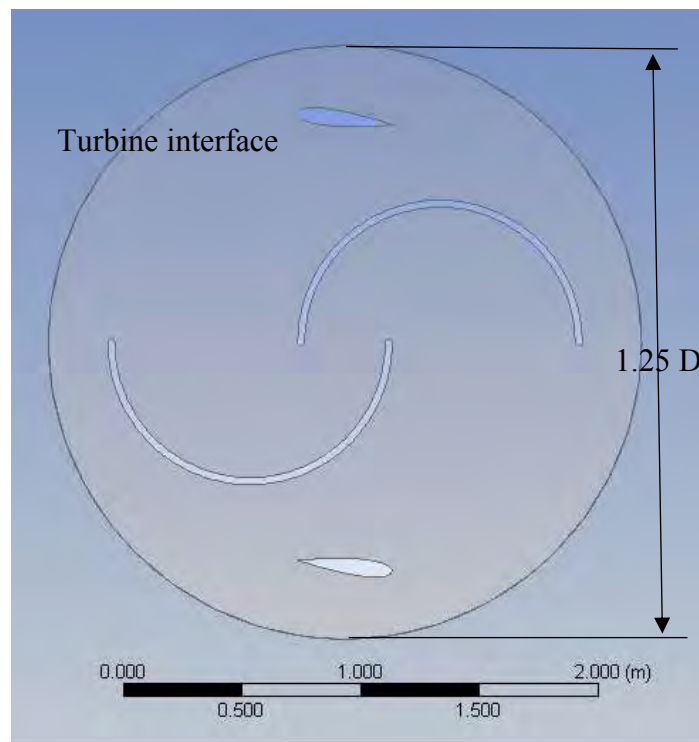
4.2. Geometri Turbin dan *Computational Domain*

Turbin akan beroperasi pada kondisi laut yg terbuka, dimana turbin diletakkan dikedalaman laut tidak kurang dari 15 meter dan tidak lebih dari 40 atau 50 meter. Untuk mewakili kondisi tersebut, maka *computational domain* yang luas harus dipertimbangkan. Pada penelitian ini ukuran *computation domain* yang

digunakan adalah $40 D \times 50 D$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dimana D adalah diameter turbin.



Gambar 4.1 *Computational Domain*



Gambar 4.2 *Skema Rotating Domain*

Pada *inlet* di-setting kecepatan *inlet*, yakni kecepatan rata-rata arus luas, pada *outlet* di-setting *static pressure* 0 atm dan dua sisi lainnya atau *walls* di-setting *symmetry condition*. Untuk menjaga kontinuitas aliran, lingkaran di sekitar sumbu rotasi turbin di-setting sebagai sebuah *interface*. Bagian dalam dari *interface* adalah *rotating domain*. *Rotating domain* didefinisikan sebagai *moving meshing* dan berputar pada kecepatan sudut yang telah ditentukan. Ukuran *rotating domain* 1.25 D. *Interface* dan *Rotating domain* dapat dilihat pada Gambar 4.2.

Tabel 4.1 berikut ini adalah definisi *boundary condition* yang digunakan dalam simulasi:

Tabel 4.1 Karakteristik Utama dari Simulasi Aliran

No	<i>Boundary condition</i>	Definisi
1	<i>Inlet</i>	Kecepatan aliran yang masuk ke dalam <i>boundary</i> .
2	<i>Outlet</i>	<i>Static pressure</i> = 0 Pa
3	<i>Walls</i>	<i>Symmetry</i>
4	Turbin	<ul style="list-style-type: none"> • <i>No slip condition</i> • <i>Walls motion: Moving wall</i> • <i>Motion: Rotational</i>

4.3. Domain Meshing

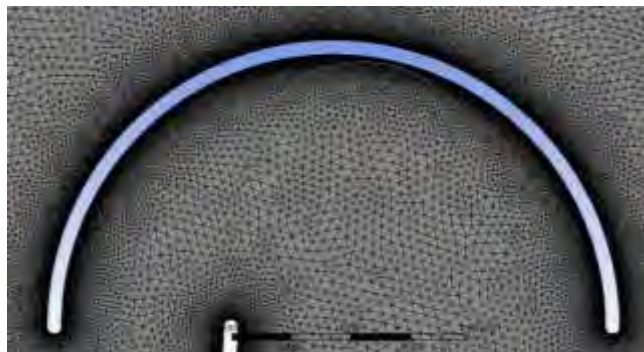
Meshing triangles dipilih untuk semua *computational domain*. Tipe *mesh* ini dipilih karena karena cocok untuk fluida cair. Karakteristik *mesh* diantara *interface* (*fixed domain* dan *rotating domain*) harus sama, karena dapat meningkatkan konvergensi saat simulasi. *Mesh* pada area di dekat profil NACA dan *puddle* Savonius harus lebih diperhatikan. Dimana *mesh* dibuat dengan ukuran lebih kecil dan rapat. Oleh sebab itu, tipe *mesh* yang digunakan adalah *inflation layer*. Hal ini dilakukan untuk menangkap fenomena fisik pada lapisan batas antara fluida dan benda (turbin). Parameter yang digunakan untuk mengukur fenomena fisik pada lapisan batas tersebut adalah *y-plus*. *Y-plus* merupakan fungsi dari tinggi *mesh* pertama (*first layer*) dari benda. Untuk simulasi turbin nilai *y-plus* tidak kurang

dari 5. Pada simulasi ini tinggi *first layer* adalah 9×10^{-5} m untuk mendapatkan nilai *y-plus* sebesar 4,39.

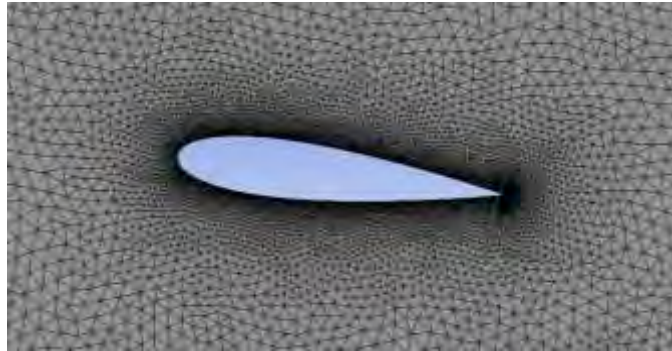
Kualitas *mesh* merupakan hal yang sangat penting dalam simulasi CFD. Ada beberapa parameter untuk mengetahui kualitas *mesh*. Untuk kasus simulasi turbin beberapa kriteria antara lain, *aspect ratio* (perbandingan tinggi dan lebar *mesh*) < 10 , dan *skewness* < 0.98 . Pada perhitungan ini, nilai, *aspect ratio*, dan *skewness* adalah 9,03 dan 0,775. Gambar 4.3, 4.4, dan 4.5 menunjukkan *mesh* pada *rotating domain*, *puddle* dan profil NACA.



Gambar 4.3 *Triangle Mesh*



Gambar 4.4 *Mesh di Dekat Puddle Savonius*



Gambar 4.5 *Mesh* di Dekat Profil NACA

4.4. Solusi Numerik

4.4.1 Penentuan Ukuran dan Jumlah *Time Steps*

Kecepatan rata-rata arus laut 0,269 m/s akan dimasukkan pada kecepatan *inlet (boundary condition)*. Sedangkan untuk memperoleh kecepatan sudut turbin, dilakukan perbandingan antara kecepatan sudut turbin dengan kecepatan arus laut disebut juga dengan *tip speed ratio* (Rumus 2.10). Nilai tersebut divariasikan menjadi 0,8; 1,2; 1,6; dan 2. Dari kecepatan sudut tersebut akan diperoleh waktu yang dibutuhkan turbin untuk berputar satu kali. Semua simulasi yang dilakukan dalam keadaan turbin berputar tujuh kali. Nilai variasi kecepatan sudut dan waktu yang diperlukan turbin berputar tujuh kali dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2 Penentuan Kecepatan Sudut dan Total Waktu Simulasi

No	Kecepatan rata-rata arus laut (m/s)	<i>Tip speed ratio</i>	Variasi kecepatan sudut turbin (rad/s)	Waktu untuk turbin berputar satu kali (s)	Total waktu (tujuh putara turbin) (s)
1	0,269	0,8	0,215	29,182	204,275
2		1,2	0,323	19,455	136,183
3		1,6	0,430	14,591	102,138
4		2	0,538	11,673	81,71

Simulasi *transient* pada turbin diselesaikan dengan menghitung nilai torsi pada setiap selang waktu tertentu. Ukuran selang waktu atau *time step* tersebut mempengaruhi nilai torsi yang dicari. Oleh karena itu, dilakukan *study* pengaruh ukuran *time step* terhadap perubahan nilai koefisien torsi. Untuk menentukan ukuran *time step* yang dilakukan pertama kali adalah menentukan nilai *Courant Number*. *Courant Number* digunakan untuk mengestimasi ukuran *time step*. *Courant Number* adalah jumlah *element mesh* yang lewat per satu *time step* sehingga dapat didefinisikan dengan rumus berikut ini:

$$Courant\ Number = \frac{Kecepatan\ Fluida \times Time\ Step}{Ukuran\ mesh\ terkecil} \quad (4.1)$$

Nilai *Courant Number* ditentukan berkisar 2 sampai 10. Semakin kecil nilai *Courant Number* maka ukuran *time step* juga semakin kecil. Sedangkan ukuran *time step* yang kecil akan meningkatkan konvergensi pada saat melakukan simulasi. Dengan ukuran *mesh* terkecil $9,35 \times 10^{-3}$ m maka nilai *Courant Number* dan ukura *time step* dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 4.3 *Courant Number* dan *Time Step Size*

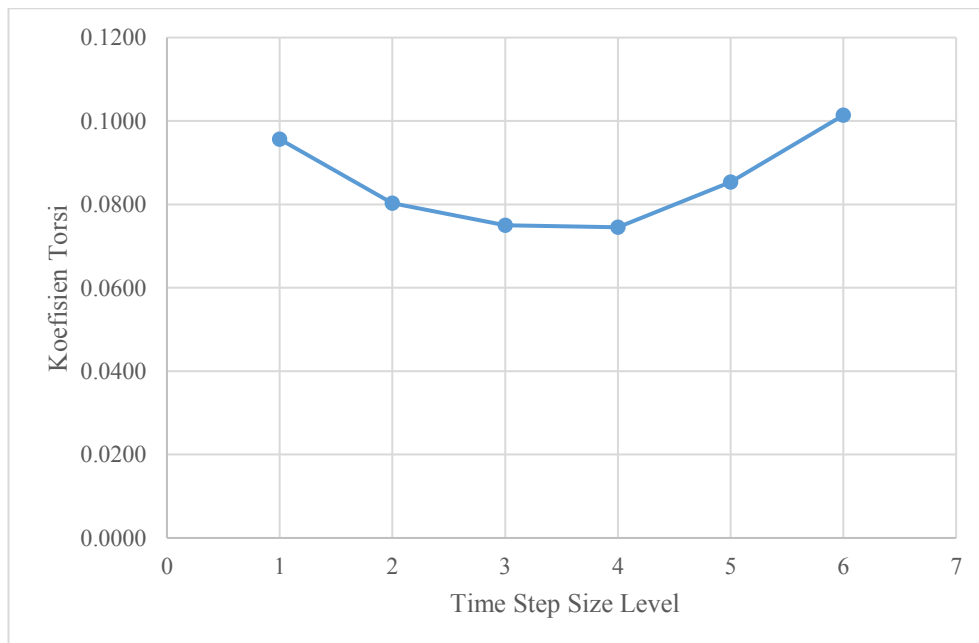
No	<i>Courant Number</i>	<i>Time step size</i>
1	2,59	0,09
2	2,302	0,08
3	2,014	0,07
4	1,727	0,06
5	1,439	0,05
6	1,151	0,06

Selanjutnya adalah melakukan simulasi pada setiap ukuran *time step* di atas dengan kecepatan sudut yang dipilih adalah 0,646 rad/s pada *speed ratio* 2,4. Simulasi dilakukan terlebih dahulu pada ukuran *time step* yang besar. Nilai yang cari adalah torsi yang dihasilkan oleh turbin. Nilai torsi pada setiap ukuran

time step akan berbeda. Ukuran *time step* yang dipakai jika perubahan koefisien torsi tidak melebihi dari 5%. Tabel 4.4 dan Gambar 4.6 menampilkan *study* pengaruh ukuran *time step* terhadap perubahan torsi:

Tabel 4.4 *Study* Pengaruh Ukuran *Time Step*

No	Ukuran <i>time step</i> (s)	Total waktu (s)	ω (rad/sec)	Jumlah <i>time step</i> (n)	Torsi (Nm)	Perubahan koefisien torsi (%)
1	0,09	68,092	0,646	757	21,666	-
2	0,08			852	18,187	-19,129
3	0,07			973	16,99	-7,045
4	0,06			1135	16,88	-0,652
5	0,05			1362	19,329	12,670
6	0,04			1703	22,968	15,844



Gambar 4.6 Pengaruh Ukuran *Time Step* terhadap Koefisien Torsi

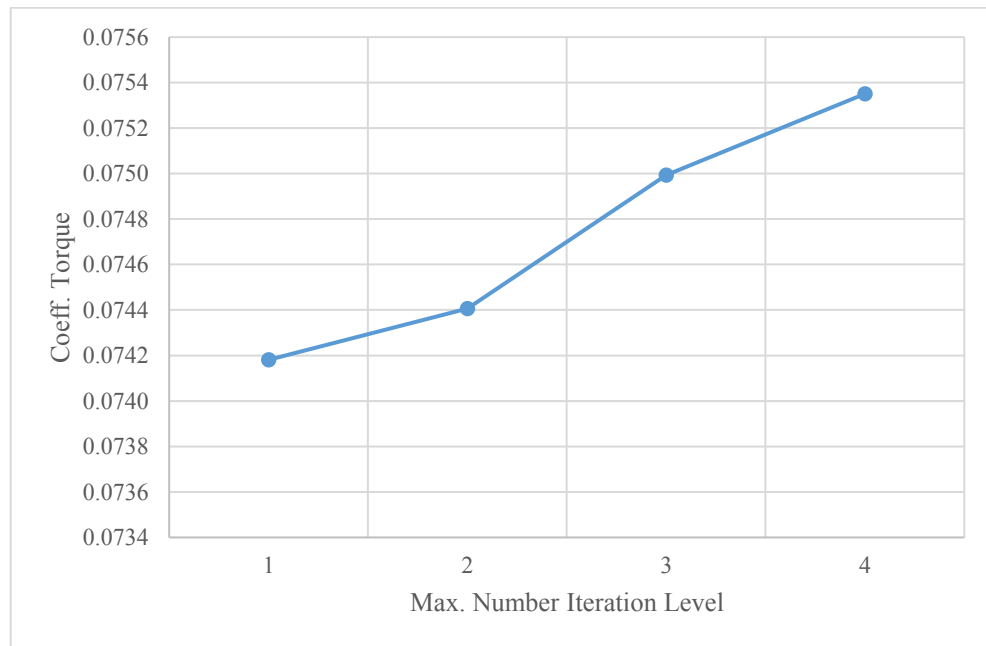
Jadi, ukuran *time step* yang digunakan adalah pada level tiga yakni 0,07 detik dengan *courant number* 2,014 karena apabila dilakukan pengurangan ukuran *time step* menjadi 0,06 perubahan terhadap nilai koefisien torsi hanya sebesar 0,652. Sebagai pertimbangan semakin kecil ukuran *time step* akan menambah waktu simulasi atau *cost computational*.

4.4.2. Penentuan Jumlah Maksimum Iterasi

Pada setiap panjang ukuran *time step* dilakukan beberapa iterasi untuk memperoleh torsi turbin. Jumlah iterasi dalam satu *time step* juga mempengaruhi nilai solusi. Oleh karena itu dilakukan juga *study* pengaruh jumlah maksimum iterasi terhadap nilai koefisien torsi. Dimana tidak terjadi perubahan nilai koefisien torsi lebih dari 1 % pada setiap jumlah maksimum iterasi. Jumlah maksimum iterasi yang dipertimbangkan adalah 40, 50, 60, dan 70. Kemudian akan dilakukan simulasi pada setiap nilai tersebut pada ukuran *time step* yang telah diperoleh sebelumnya. Tabel 4.5 dan Gambar 4.7 berikut ini menunjukkan hasil simulasi tersebut:

Tabel 4.1 *Study* Pengaruh Jumlah Maksimum Iterasi

No	Ukuran <i>time step</i> (s)	Jumlah maksimum iterasi (n)	Torsi (Nm)	Perubahan nilai koefisien torsi (%)
1	0,07	40	16,806	-
2		50	16,857	0,303
3		60	16,990	0,783
4		70	17,071	0,474



Gambar 4.7 Pengaruh Jumlah Maksimum Iterasi Terhadap Koefisien Torsi

Jadi jumlah maksimum iterasi yang digunakan adalah 70. Pada setiap level, jumlah maksimum iterasi memenuhi syarat perubahan torsi yaitu kurang dari 1 %. Pemilihan nilai 70 dilakukan karena semakin besar nilai dari jumlah maksimum iterasi maka akan meningkatkan konvergensi simulasi.

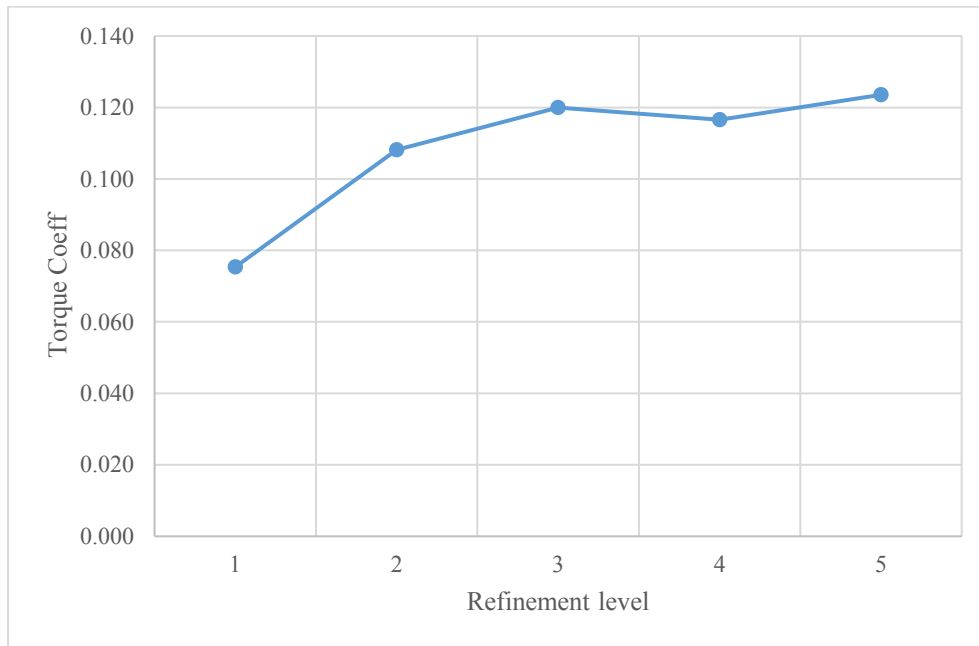
4.4.3. Study Grid Independence

Tahap selanjutnya adalah menentukan jumlah *grid* atau *mesh*. Dimana dilakukan peningkatan jumlah *mesh*, sehingga tidak terjadi perubahan nilai koefisien torsi lebih dari 3%. Tabel 4.6 dan Gambar 4.8 berikut ini menampilkan hasil dari *study grid independence*:

Tabel 4. 5 Study Grid Independence

<i>Refinement Level</i>	<i>No. of nodes</i>	<i>No. of element</i>	Torsi (Nm)	Perubahan Koef. Torsi (%)
1	203806	331234	17,071	-
2	225652	374328	24,507	30,342
3	262336	447110	27,172	9,808

4	307500	536916	26,416	-2,862
5	327068	575829	27,987	5,613



Gambar 4.8 Pengaruh Jumlah *Grid* atau *Mesh* Terhadap Koefisien Torsi

Jadi solusi untuk studi *grid independence* adalah *refinement level* dengan jumlah *nodes* 262.336 dan jumlah element 447.110. Karena apabila dilakukan peningkatan jumlah *mesh* tidak akan menyebabkan perubahan torsi yang begitu besar yakni 2,862%.

4.4.4. Kriteria Konvergensi, Model Numerik dan Detail Solver

Pengertian konvergensi dalam simulasi CFD apabila semua formula dalam simulasi telah selesai dihitung. Untuk mencapai titik konvergensi dipengaruhi oleh ukuran *time step*, dan kualitas *mesh*. Apabila sebuah simulasi tidak mencapai konvergensi, maka hal pertama dilakukan adalah mengurangi ukuran *time step* dan meningkatkan kualitas *mesh*. Pada studi ini kriteria konvergensi di-*setting* pada nilai 10^{-4} .

Model turbulen yang biasa digunakan dalam simulasi turbin adalah *Realizable $k-\varepsilon$* dan *$k-\omega$ based SST*. Kedua model turbulen tersebut direkomendasikan untuk simulasi zona rotasi (*rotating zone*). Tetapi untuk menanggapi fenomena fisik pada *boundary layer* disekitar turbin, model turbulen yang digunakan adalah *$k-\omega$ based SST*. Pada sub-bab sebelumnya telah dibahas bahwa tinggi *mesh* pertama penting untuk memperoleh nilai *y-plus* yang diinginkan. Sehingga untuk memperoleh nilai *y-plus* tersebut maka pada simulasi ini model turbulen yang dipilih adalah *$k-\omega$ based SST*.

Tabel 4.7 menampilkan model numerik dan *detail solver* yang digunakan pada saat simulasi.

Tabel 4.6 Model Numerik dan Detail Solver

No	Tipe Solusi	<i>Sliding Mesh</i>
1	<i>Transient</i>	<i>2nd order implicit</i>
2	<i>Turbulence</i>	<i>$k-\omega$ based SST</i>
3	<i>Pressure</i>	<i>2nd order</i>
4	<i>Momentum</i>	<i>2nd order</i>
5	ω	<i>2nd order</i>
6	k	<i>2nd order</i>
7	<i>P-V Coupling</i>	<i>Pressure based non segregated</i>

4.5. Perhitungan Koefisien Torsi dan Koefisien Daya Turbin dengan Menggunakan CFD

Setelah mendapatkan *setting-an* untuk simulasi yang tepat, maka selanjutnya adalah menyelesaikan simulasi untuk kedua model turbin. *Output* setiap simulasi adalah besaran torsi yang diperoleh. Variasi kecepatan sudut dilakukan pada simulasi tersebut, sedangkan kecepatan *inlet* konstan. Setiap simulasi dilakukan dengan turbin berputar tujuh kali. Kecepatan sudut mempengaruhi waktu dibutuhkan untuk simulasi. Rata-rata waktu yang diperlukan untuk simulasi adalah

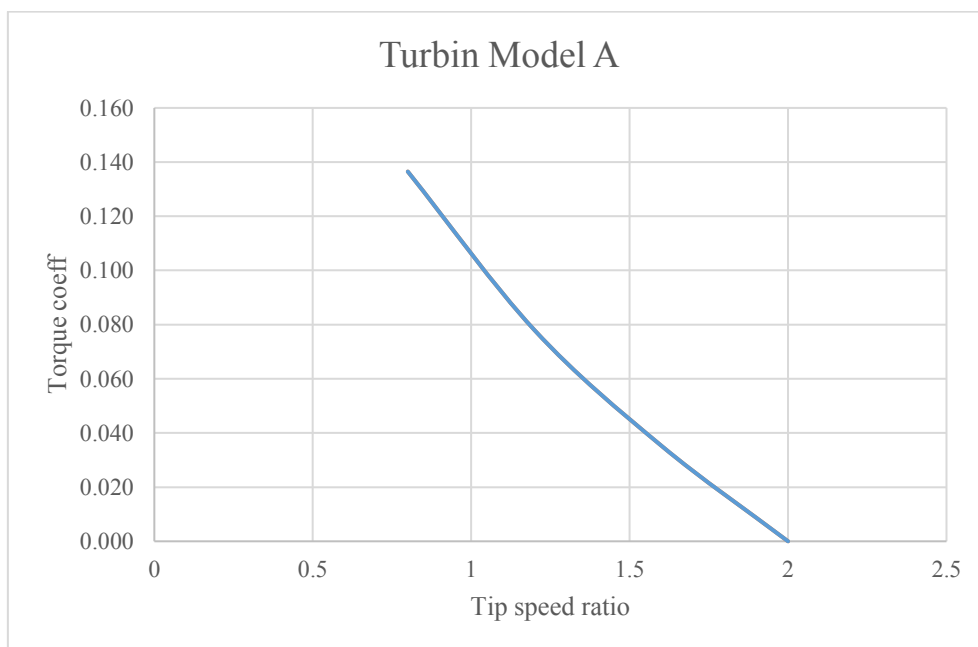
15-24 jam. Hasil perhitungan akan ditampilkan dalam bentuk grafik vs *tip speed ratio* vs koefisien torsi, dan *tip speed ratio* vs koefisien daya.

4.5.1. Koefisien Torsi dan Koefisien Daya pada Turbin Model A

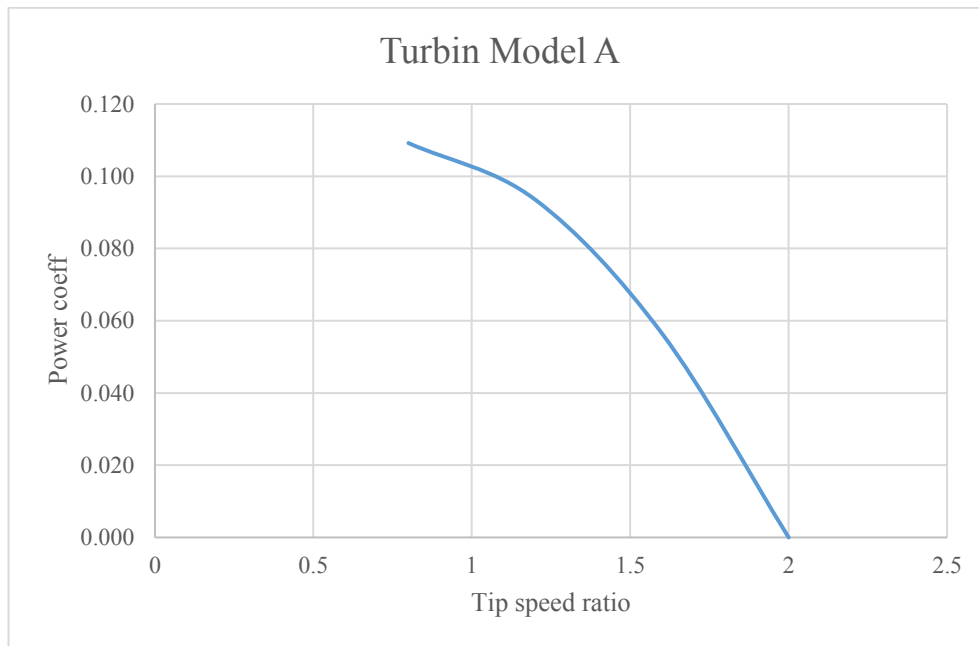
Tabel 4.8, Gambar 4.9 dan 4.10 menampilkan hasil perhitungan torsi, koefisien torsi, daya dan koefisien daya dari turbin model A.

Tabel 4.7 Nilai Torsi, Koef. Torsi dan Koef. Daya Turbin Model A

No	<i>Speed Ratio</i>	ω (rad/s)	Torsi	Koef. Tosi	Daya	Koef. Daya
1	0,8	0,215	30,923	0,136	6,655	0,109
2	1,2	0,323	17,658	0,078	5,7	0,094
3	1,6	0,430	7,998	0,035	3,442	0,056
4	2	0,538	0	0	0	0



Gambar 4.9 Koefisien Torsi sebagai Fungsi *Speed Ratio* Untuk Turbin Model A



Gambar 4.10 Koefisien Daya sebagai Fungsi Speed Ratio untuk Turbin Model A

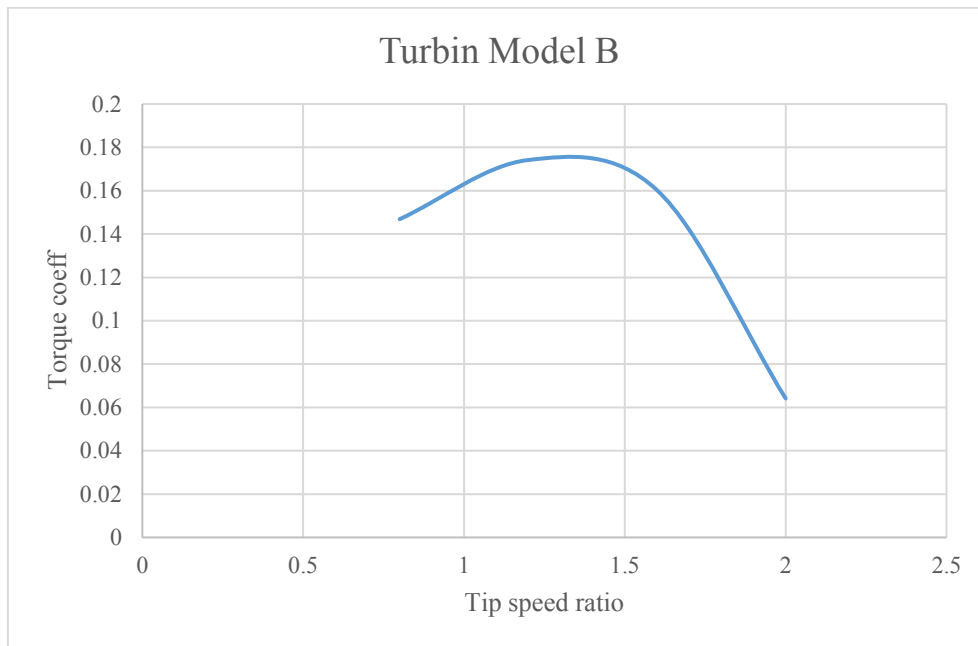
Koefisien torsi maksimum dari turbin model A adalah 0,136 pada *tip speed ratio* 0,8. Sedangkan koefisien daya maksimum adalah 0,109 pada *tip speed ratio* yang sama.

4.5.2. Koefisien Torsi dan Koefisien Daya pada Turbin Model B

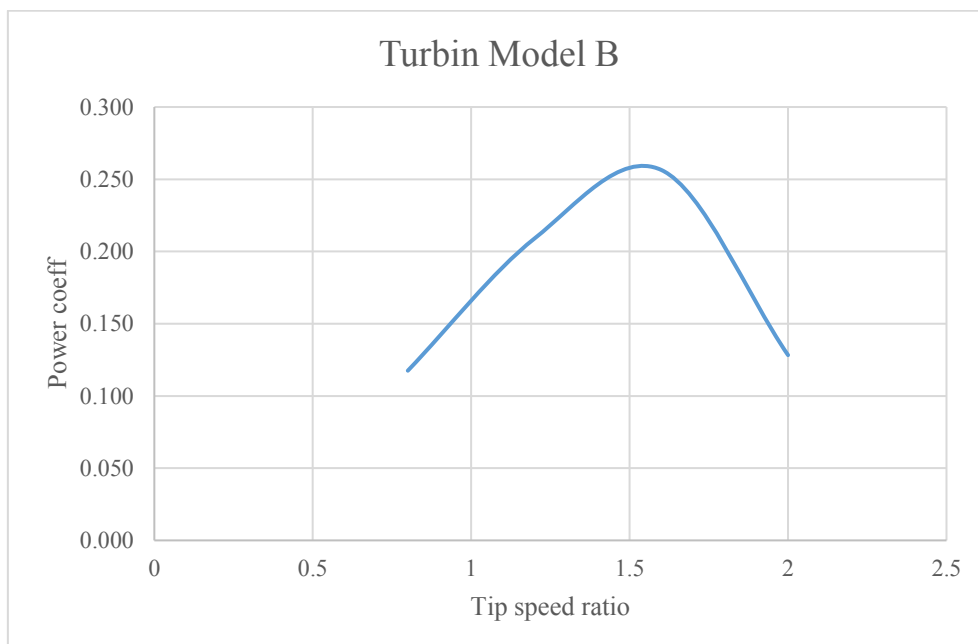
Tabel 4.9, Gambar 4.11 dan 4.12 adalah hasil perhitungan torsi, koefisien torsi, daya dan koefisien daya dari turbin model B.

Tabel 4.8 Nilai Torsi, Koef. Torsi dan Koef Daya Turbin Model B

No	Speed Ratio	ω (rad/s)	Torsi	Koef. tosi	Daya	Koef. daya
1	0,8	0,215	33,27	0,147	7,159	0,117
2	1,2	0,323	39,458	0,174	12,737	0,209
3	1,6	0,430	36,307	0,160	15,627	0,256
4	2	0,538	14,528	0.064	7,816	0,128



Gambar 4.11 Koefisien Torsi sebagai Fungsi Speed Ratio untuk Turbin Model B

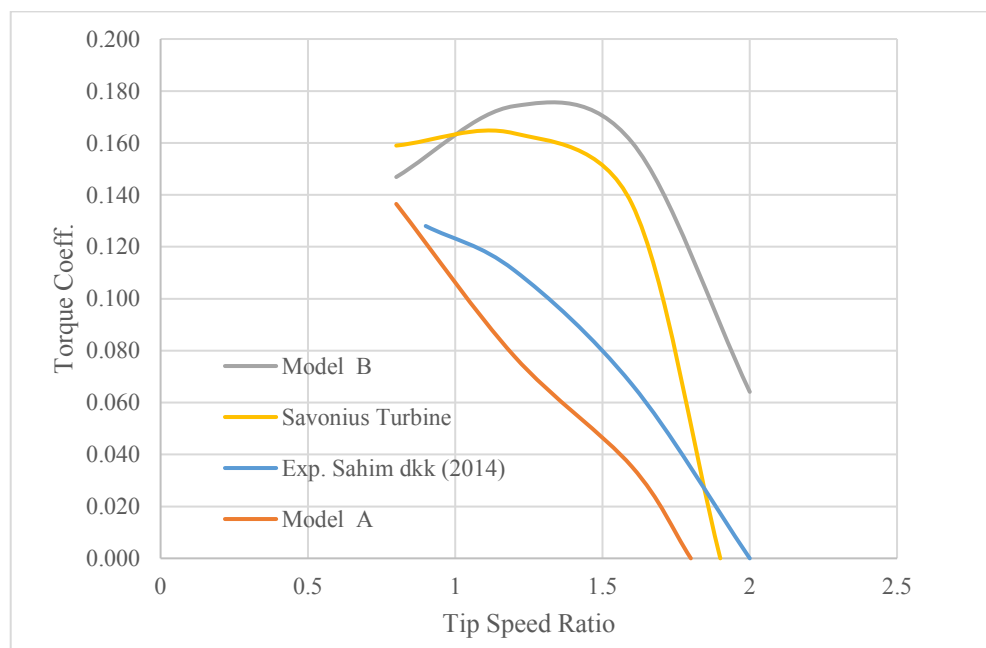


Gambar 4.12 Koefisien Daya sebagai Fungsi *Speed Ratio* untuk Turbin Model B

Koefisien torsi maksimum dari turbin model B adalah 0,174 pada *tip speed ratio* 0,8; sedangkan koefisien daya maksimum 0,256 pada *tip speed ratio* 1,6.

4.5.3. Perbandingan Hasil Perhitungan Koefisien Torsi dan Koefisien Daya pada Model A, Model B, Hasil Penelitian Eksperimen Turbin Air Darrieus-Savonius Sahim dkk, (2014) dan Turbin Savonius.

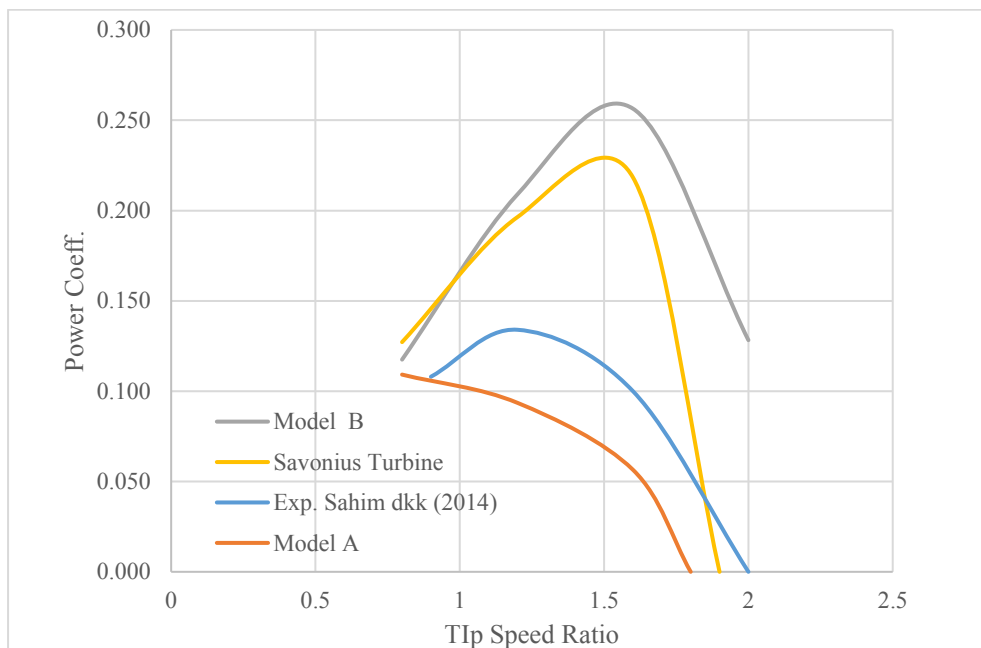
Jika dibandingkan nilai koefisien torsi dari turbin model A dan model B, dapat disimpulkan bahwa koefisien torsi yang dihasilkan oleh turbin model B lebih besar dari turbin model A. Hal tersebut bisa dilihat pada Gambar 4.13 di bawah ini:



Gambar 4.13 Perbandingan Nilai Koefisien Torsi Turbin Model A dan B, dengan Hasil Publikasi Eksperimen dan turbin Savonius

Hasil koefisien torsi simulasi CFD dengan hasil eksperimen Sahim dkk (2014) memiliki pola grafis yang sama. Berturut tren grafik koefisien torsi tertinggi adalah turbin model B, turbin Savonius, eksperimen Sahim dkk (2014) dan modal A.

Demikian juga untuk koefisien daya, dimana turbin B memiliki nilai yang lebih tinggi dari model A, seperti yang terlihat pada Gambar 4.14 di bawah ini:

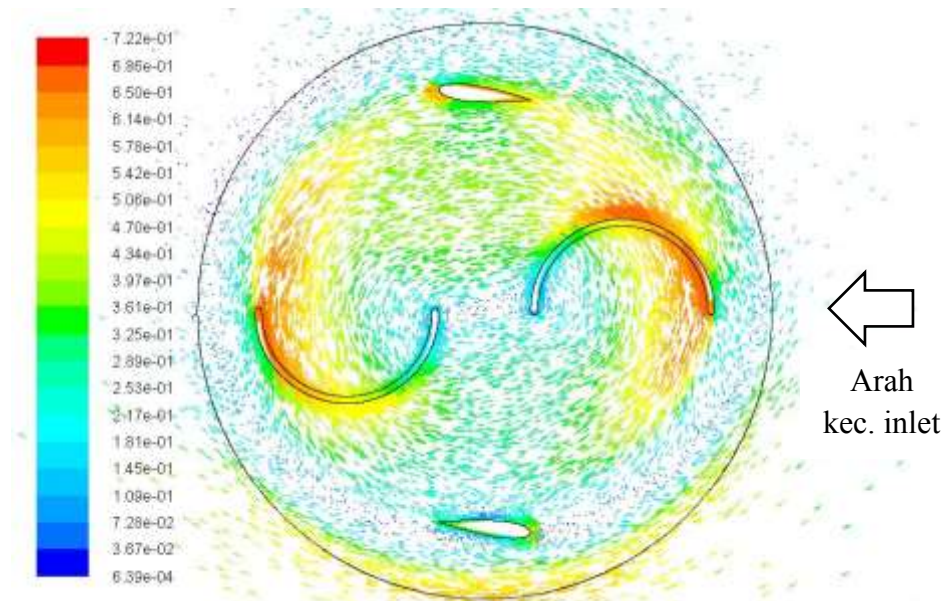


Gambar 4.14 Perbandingan Nilai Koefisien Daya Turbin Model A dan B, dengan Hasil Publikasi Eksperimen dan Turbin Savonius

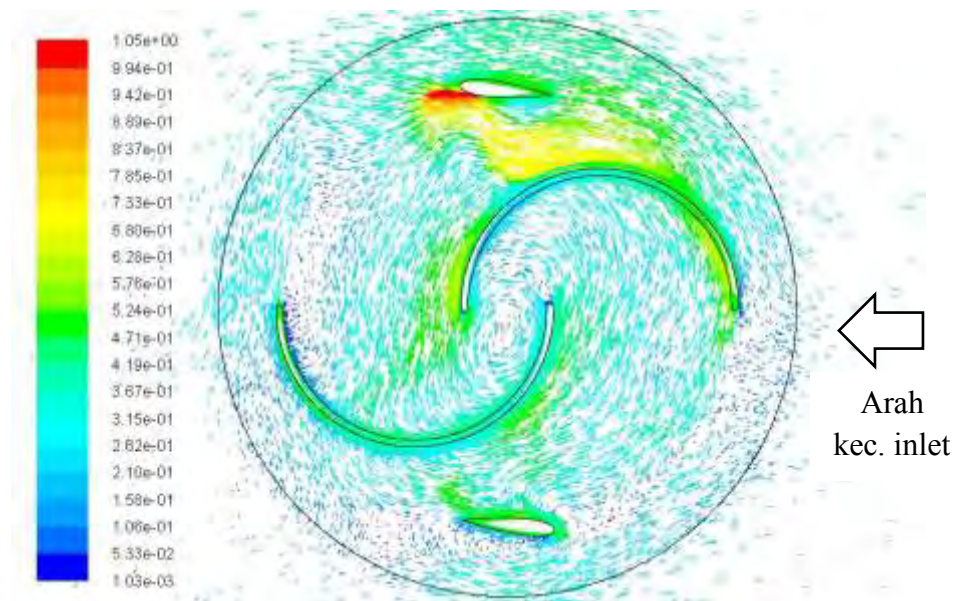
Model B memiliki koefisien daya maksimum 0,256 pada *tip speed ratio* 1,6; model A memiliki koefisien daya maksimum 0,109 pada *tip speed ratio* 1,2; eksperimen turbin Darrieus-Savonius Sahim dkk (2014) memiliki koefisien daya maksimum 0,134 pada *tip speed ratio* 0,88 dan turbin Savonius memiliki koefisien daya maksimum pada 0,218 pada *tip speed ratio* 1,6. Sehingga dapat disimpulkan bahwa model B memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan model turbin yang lain.

Turbin kombinasi Darrieus-Savonius model B memiliki performa yang lebih baik dibandingkan Model A karena turbin model B memiliki diameter *paddle* yang lebih besar dari model A, sehingga turbin model B lebih banyak menangkap aliran fluida. Selain itu turbin model B memiliki *overlap paddle*, yang mampu meningkatkan performa turbin karena aliran yang melalui *paddle*/sudu dapat diteruskan oleh *overlap paddle* ke *paddle* yang lain, sehingga dapat meningkatkan torsi turbin. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 yang menunjukkan vektor kecepatan aliran fluida pada turbin model A dan model B.

Darrieus-Savonius model B memiliki performa yang baik dari pada pada turbin Savonius. Hal itu dapat dilihat dari tren grafik turbin Savonius berada di bawah grafik dari turbin model B seperti yang terlihat pada Gambar 4.14. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan profil NACA pada turbin Savonius dapat meningkatkan kinerja turbin sebesar 34% (untuk turbin model B).



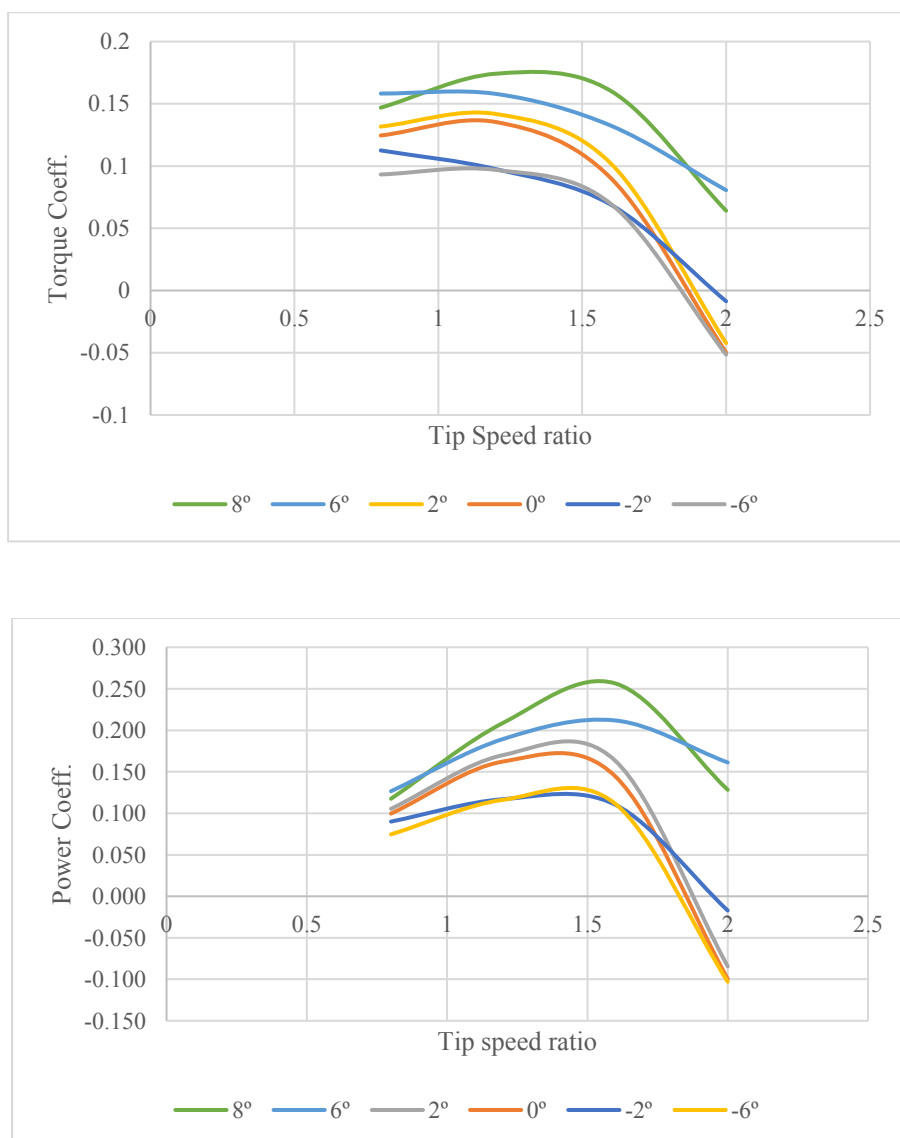
Gambar 4.15 Vektor Kecepatan Turbin Model A



Gambar 4.16 Vektor Kecepatan Tubin Model B

4.6. Efek Sudut *Pitch* Profil NACA 0018 pada Performa Turbin Darrieus-Savonius

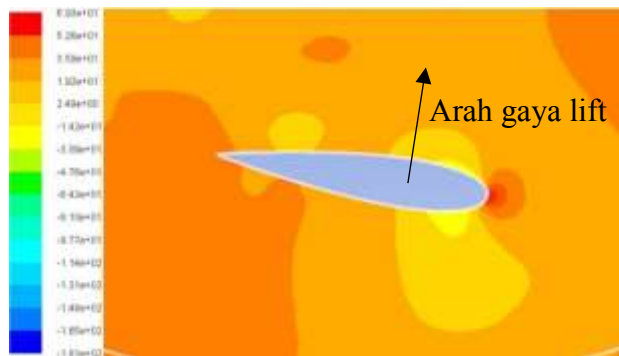
Pada bagian ini efek dari sudut *pitch* (β) profil NACA akan didiskusikan pengaruh terhadap performa turbin. Variasi sudut *pitch* yang dipertimbangkan adalah 0° , 2° , -2° , 6° -6° , dan 8° . Variasi sudut *pitch* dilakukan pada turbin Model B dengan hasil simulasi CFD dapat dilihat pada Gambar 4.17.



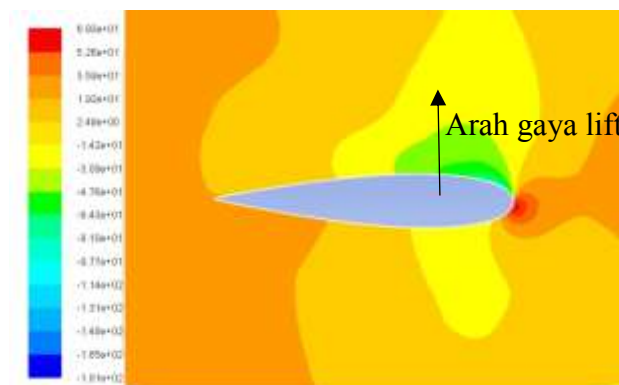
Gambar 4.17 Koefisien Toris dan Daya sebagai Fungsi dari *Tip Speed Ratio* untuk Variasi Sudut *Pitch* Profil NACA

Berdasarkan gambar di atas disimpulkan bahwa sudut *pitch* optimum profil NACA adalah 8° . Sedangkan sudut *pitch* -6° memiliki koefisien torsi dan koefisien daya yang lebih rendah.

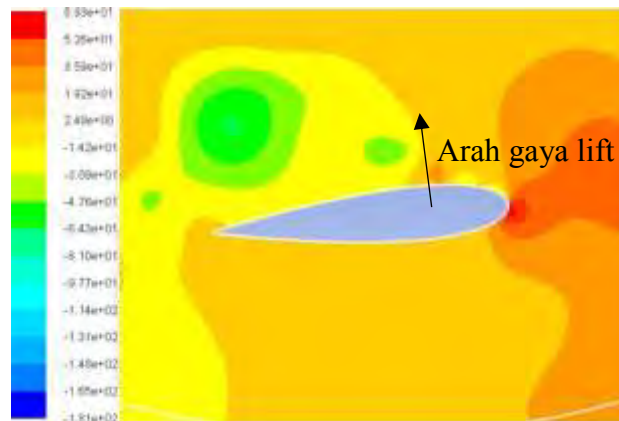
Semakin besar sudut *pitch* (arah positif) menyebabkan peningkatan gaya *lift* yang dialami oleh profil NACA, karena semakin besarnya perbedaan kecepatan dua bagian profil NACA sehingga menimbulkan besarnya perbedaan tekanan antara dua permukaan dari profil NACA. Pertimbangan lainnya adalah dengan meningkatnya besaran sudut 0° ke 8° maka arah gaya *lift* bergerak ke bagian *leading edge* profil NACA. Sehingga mendorong turbin ke arah depan. Gambar 4.18 berikut ini menunjukkan kontur *static pressure* pada dua permukaan profil NACA.



a) Sudut *Pitch* 8°



b) Sudut *Pitch* 0°

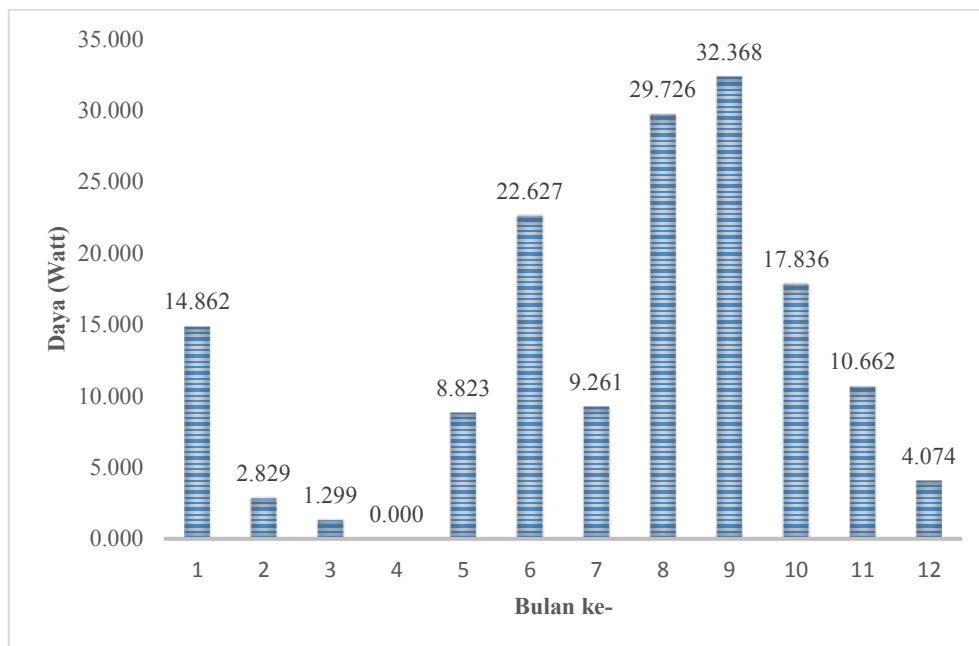


c) Sudut *Pitch* -6°

Gambar 4.18 Kontur *Static Pressure* pada Profil NACA 0018

5.7. Potensi Energi Listrik dari Arus Laut di Perairan Sebelah Barat Pulau Giliyang, Madura

Kecepatan arus laut setiap bulan di perairan sebelah barat Pulau Giliyang tidak sama. Menurut data BMKG Surabaya, kecepatan rata-rata arus laut terbesar tahun 2015 adalah pada bulan September yakni 0,404 m/s sedangkan yang terendah pada bulan April yakni 0,086 m/s. Untuk mengetahui potensi energi listrik dari arus laut tersebut dilakukan perhitungan daya yang dihasilkan pada setiap bulannya. Perhitungan daya dilakukan dengan menggunakan turbin Darrieus-Savonius model B dengan *tip speed ratio* 1.6 dan sudut *pitch* profil NACA 8° . Daya yang dihasilkan dalam tiap bulan pada tahun 2015 dapat dilihat pada Gambar 4.19 dibawah ini:



Gambar 4.19 Potensi Energi Listrik per Bulan pada Tahun 2015

Daya terbesar terletak pada bulan September sebesar 32,368 Watt. Pada bulan Februari, Maret dan April daya yang dihasilkan cenderung lebih kecil dari bulan yang lainnya. Penggunaan turbin sebagai pembangkit listrik optimum dilakukan pada bulan Mei sampai Januari. Potensi listrik dari arus laut selama tahun 2015 adalah 154.367 Watt dengan catatan hanya menggunakan satu turbin.

LAMPIRAN

**LAMPIRAN 1. DATA KECEPATAN ARUS LAUT DI SEBELAH BARAT
PULAU GILİYANG, MADURA DARI TAHUN 2014-2015**



BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA
STASIUN METEOROLOGI MARITIM PERAK SURABAYA

Jalan Kalimas Baru 97 B
 Surabaya - 60165

TGM KASMAR SURABAYA
 Email: meteomartimsby@yahoo.co.id

Telp/Fax : (031) 3291439
 Telp/Fax : (031) 3287123

DATA ARUS WILAYAH BARAT PULAU GILYANG TAHUN 2014

TGL	Januari		Februari		Maret		April		Mei		Juni		Juli		Agustus		September		Oktober		November		Desember	
	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec
1	198	30.3	168	65.5	358	2.0	337	16.6	7	4.6	334	24.0	344	32.4	341	42.8	349	36.0	337	31.5	324	10.3	110	7.3
2	141	19.2	209	56.8	131	4.8	355	17.7	104	10.8	337	29.6	347	31.2	344	38.9	346	40.5	339	32.7	331	20.0	138	19.6
3	141	13.2	279	25.7	143	6.4	352	16.6	107	18.3	344	34.8	353	39.7	350	40.9	343	34.3	335	36.0	347	24.8	141	12.9
4	137	27.0	286	18.0	165	4.3	84	9.2	115	21.4	345	50.4	342	50.0	359	57.9	352	24.1	335	38.9	340	16.0	142	7.8
5	132	35.4	272	7.3	173	9.4	102	3.1	87	15.7	340	51.5	350	48.2	358	63.9	355	21.8	338	32.7	328	9.4	144	20.7
6	139	38.5	296	8.9	141	15.1	138	9.0	38	18.0	338	39.5	345	46.8	341	53.1	352	31.1	338	31.0	350	4.6	153	27.3
7	144	36.7	245	13.4	141	4.4	145	30.2	1	25.4	339	38.3	351	45.8	343	51.8	343	36.7	336	36.8	354	12.0	158	41.8
8	136	23.2	272	15.3	147	4.6	139	32.5	354	18.8	337	38.8	337	43.8	335	53.0	339	48.0	336	36.3	340	10.6	151	47.8
9	138	7.8	231	14.8	174	15.6	141	26.1	341	17.7	348	32.9	321	87.3	336	51.1	340	46.0	332	24.6	340	12.6	140	54.3
10	148	4.2	250	17.8	175	11.7	139	15.1	358	16.7	345	25.7	49	90.5	342	44.9	338	43.3	325	26.4	353	12.4	135	31.3
11	311	1.9	237	21.4	164	11.1	126	11.6	355	19.0	336	26.2	47	87.0	340	53.2	340	43.9	326	25.6	337	10.2	128	24.6
12	180	11.5	217	11.5	146	23.6	132	11.4	346	16.2	337	16.6	46	83.5	338	54.1	342	39.8	326	24.8	329	6.0	145	23.0
13	147	57.3	210	10.9	145	18.9	137	25.3	41	14.7	4	26.1	45	80.1	344	50.5	339	51.2	327	24.0	68	4.2	222	7.9
14	140	75.1	163	20.0	162	5.6	140	10.7	4	15.2	345	35.3	43	76.7	341	46.3	332	43.7	327	23.2	57	5.3	294	3.8
15	155	69.5	150	26.8	178	2.4	109	6.2	3	15.5	347	28.6	42	73.4	340	43.4	338	42.2	328	22.4	81	5.3	288	3.2
16	143	65.4	203	26.5	131	4.2	354	2.9	112	30.8	337	26.6	348	70.2	342	38.8	347	29.0	335	21.6	329	4.6	137	6.1
17	192	62.0	140	8.2	325	4.8	7	2.4	348	34.8	7	28.5	38	67.0	336	35.2	351	27.8	329	20.8	38	5.3	143	20.0
18	224	50.2	218	10.3	324	3.3	129	4.6	337	22.4	9	35.3	36	63.9	344	25.0	3	30.4	330	20.0	358	11.2	139	9.7
19	230	65.5	188	25.7	17	15.7	149	4.3	340	19.9	359	39.9	34	60.9	339	27.1	353	51.8	330	19.2	345	20.5	119	4.9
20	203	68.2	156	28.3	143	19.8	130	3.8	331	21.1	341	38.6	31	60.4	342	28.5	339	54.9	331	19.1	350	21.4	120	4.6
21	203	62.3	175	21.9	219	7.7	100	2.2	340	22.0	358	14.7	29	55.2	343	36.9	343	44.8	332	17.6	358	8.9	144	5.2
22	177	52.0	148	29.3	309	4.3	122	2.9	346	27.7	343	16.7	28	52.6	347	45.9	346	31.9	333	16.8	359	7.3	82	1.7
23	220	40.3	216	29.4	310	5.7	162	4.2	358	29.7	351	16.0	22	50.1	335	53.0	342	47.0	334	16.0	31	12.0	62	4.0
24	202	34.1	199	16.7	318	2.3	128	0.9	344	16.8	7	22.0	19	47.9	335	52.2	339	47.1	335	15.3	338	13.0	304	1.9
25	201	33.4	189	10.9	324	6.0	296	1.9	79	25.3	360	42.7	15	45.9	339	44.6	338	41.4	336	14.5	337	6.0	295	0.9
26	165	38.0	230	9.5	352	3.9	61	0.6	4	36.3	352	47.1	10	44.1	336	44.6	331	31.1	337	13.7	351	3.8	172	2.0
27	175	31.4	294	4.8	39	3.8	46	3.3	338	39.0	344	36.9	6	42.6	340	42.6	337	31.0	339	13.0	18	2.6	135	20.1
28	203	26.7	201	1.5	129	7.0	354	16.3	341	28.6	348	32.5	1	41.4	339	37.3	336	36.5	340	12.3	32	3.2	128	37.2
29	215	52.2			101	9.0	338	5.7	342	32.8	346	31.6	355	40.6	338	39.3	335	32.0	342	11.5	130	5.6	133	26.3
30	186	67.0			20	14.5	340	4.0	343	28.4	346	34.2	350	40.1	339	33.0	335	34.1	344	10.8	128	8.3	133	21.7
31	182	67.2			7	22.6			344	25.5			344	40.1	338	32.6			347	9.7			140	28.4

Catatan : Kecepatan Arus Dalam cm/s, Arah Arus Dalam Derajat

Surabaya, 31 Maret 2016
 A.n Kasi Observasi & Informasi

Rembulan Jurnaliska

Rembulan Jurnaliska
 NIP. 198901272012122001



BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA
STASIUN METEOROLOGI MARITIM PERAK SURABAYA

Jalan Kalimas Baru 97 B
 Surabaya - 60165

TGM : KASMAR SURABAYA
 Email : meteomaritimsby@yahoo.co.id

Telp/Fax : (031) 3291439
 Telp/Fax : (031) 3287123

DATA ARUS WILAYAH BARAT PULAU GILİYANG TAHUN 2015

TGL	Januari		Februari		Maret		April		Mei		Juni		Juli		Agustus		September		Oktober		November		Desember	
	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec	Arah	Kec
1	144	52.7	166	18.8	196	8.3	24	8.4	340	3.4	354	23.3	341	22.4	341	34.6	349	37.2	334	51.7	346	18.9	347	6.5
2	144	60.4	88	8.9	160	34.2	8	4.5	347	4.5	341	17.8	355	27.6	348	40.9	344	42.9	331	48.9	328	16.8	345	5.9
3	143	60.6	126	11.4	162	25.6	106	7.7	33	3.2	356	24.8	353	30.3	341	37.4	346	48.9	335	51.1	334	18.1	350	8.3
4	148	57.8	134	24.6	208	23.2	101	5.9	44	5.4	342	46.1	346	26.5	343	35.4	342	43.2	328	40.7	338	23.9	4	10.3
5	146	54.2	149	17.4	164	41.4	18	8.0	358	10.9	342	54.6	335	32.4	356	34.2	331	42.0	348	28.0	347	17.2	342	4.4
6	145	36.5	139	17.6	175	19.1	147	21.4	10	21.5	334	53.0	340	39.2	346	40.7	339	38.5	339	29.4	351	24.4	162	1.1
7	146	42.2	139	14.5	168	7.4	172	6.0	351	32.3	342	36.7	347	42.1	349	36.4	338	37.4	344	24.9	341	22.8	18	2.2
8	163	60.3	143	17.1	237	12.6	322	6.7	343	36.2	344	28.1	352	41.4	356	41.1	338	37.8	340	29.8	342	6.6	330	8.1
9	152	75.3	156	15.9	260	10.1	327	7.2	344	32.0	343	32.2	338	43.3	346	57.1	341	43.7	341	32.0	347	9.3	360	6.3
10	167	49.2	148	22.2	237	14.3	335	10.2	340	31.4	337	28.8	341	31.9	354	47.8	341	53.0	333	39.9	351	13.4	353	3.9
11	199	29.0	149	48.4	209	18.3	355	9.7	349	32.9	345	25.7	349	38.0	339	52.5	335	45.6	345	32.9	350	13.7	74	3.4
12	200	19.5	156	27.6	202	20.5	106	11.6	345	35.8	339	28.6	331	58.8	349	32.5	340	42.9	342	30.3	348	19.0	147	1.7
13	158	27.5	209	13.4	169	12.7	156	3.7	342	34.6	343	35.1	10	56.9	341	36.9	338	44.9	339	33.3	338	22.6	142	6.0
14	147	38.5	232	5.5	184	13.0	287	1.0	346	39.9	337	29.5	342	44.5	344	45.1	349	38.0	339	34.0	331	16.5	147	30.2
15	132	34.2	171	4.2	141	19.0	105	6.7	353	42.7	352	28.9	6	27.5	350	54.4	335	34.3	336	35.7	337	21.2	138	24.1
16	145	22.5	95	8.1	154	21.8	7	8.6	344	33.0	339	28.2	357	34.2	345	45.3	343	38.2	329	28.5	330	13.7	345	30.7
17	146	40.2	155	14.2	136	16.8	9	6.4	355	21.8	330	27.4	345	48.1	343	33.7	350	37.4	334	37.1	355	13.3	152	56.0
18	160	44.6	148	19.2	114	3.3	337	6.1	347	26.6	333	34.1	338	41.8	345	36.2	342	33.4	339	39.3	336	11.5	153	60.0
19	175	26.1	159	42.9	6	7.6	15	1.9	336	23.3	343	35.0	343	41.9	345	32.3	337	29.5	330	35.5	13	20.8	147	62.6
20	162	25.4	177	45.4	2	9.3	145	2.1	351	20.4	349	35.2	347	40.6	347	32.8	348	30.4	345	32.8	341	26.1	153	61.2
21	150	18.9	153	21.1	1	8.9	187	4.1	346	27.0	346	35.9	339	31.1	341	30.0	329	30.5	342	35.4	341	20.0	215	22.1
22	150	36.0	224	10.7	86	4.8	219	4.9	341	35.5	344	28.3	354	29.4	341	35.4	335	44.8	348	35.0	358	15.8	295	18.3
23	180	21.0	194	18.7	117	1.3	239	8.9	342	27.5	339	35.0	344	33.5	344	35.7	335	41.4	345	32.4	338	19.3	291	10.9
24	146	23.2	187	13.4	147	1.6	184	19.0	349	18.1	339	38.7	349	31.1	346	35.8	338	39.0	352	23.8	343	11.0	218	18.7
25	167	37.0	149	6.0	72	1.9	183	44.4	5	21.9	335	33.1	348	37.4	340	31.5	343	41.2	353	23.2	345	4.4	202	13.7
26	165	35.8	161	8.1	328	8.0	161	20.1	345	33.1	349	38.2	349	40.4	340	34.1	338	41.8	347	20.8	334	7.7	277	10.8
27	161	23.1	189	3.9	332	5.9	161	10.6	346	21.6	350	39.9	337	46.4	343	28.5	343	39.3	351	20.2	2	8.4	158	8.7
28	150	34.2	284	2.1	325	10.4	163	16.0	348	26.1	346	32.2	334	45.5	338	36.2	346	44.4	341	27.1	16	8.8	138	11.6
29	142	35.3			329	11.8	163	5.5	335	29.7	344	28.9	341	45.5	338	47.6	345	42.7	347	30.0	344	11.3	150	13.7
30	175	30.5			344	9.1	164	2.0	343	27.0	357	28.3	337	48.5	343	51.9	342	48.8	348	24.3	339	11.3	130	8.0
31	175	21.1			352	7.2			342	23.4			341	47.7	335	42.8			344	12.4			143	5.1

Catatan : Kecepatan Arus Dalam cm/s, Arah Arus Dalam Derajat

Surabaya, 31 Maret 2016
 A.n Kasi Observasi & Informasi

[Signature]

Rembulan Jurnaliska
 NIP. 198901272012122001

LAMPIRAN 2. TABEL PERHITUNGAN *TIME STEP*

No	Time steps size (s)	Number time step (7 rev)	Number of iteration	Torsi (Nm)	$1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot r$ (Nm)	Koefisien torsi	Perubahan Koef Torsi (%)	Daya	$1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$	Koef daya	Yplus	Courant Number	Number of Node	Number of Element
1	2	3	4	5	6	7 = 5/6	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.09	757	60	21.666	226.555	0.0956	-	13.996	60.943	0.230	4.33	2.590	203806	331234
2	0.08	852	60	18.187	226.555	0.0803	-19.129	11.749	60.943	0.193	4.529	2.302		
3	0.07	973	60	16.99	226.555	0.0750	-7.045	10.976	60.943	0.180	4.6	2.014		
4	0.06	1135	60	16.88	226.555	0.0745	-0.652	10.904	60.943	0.179	4.721	1.727		
5	0.05	1362	60	19.329	226.555	0.0853	12.670	12.487	60.943	0.205	4.937	1.439		
6	0.04	1703	60	22.968	226.555	0.1014	15.844	14.837	60.943	0.243	4.958	1.151		

LAMPIRAN 3. TABEL PERHITUNGAN JUMLAH MAKSIMUM ITERASI

No	time step size (s)	Number time step (n)	max. number iteration (n)	Torsi (Nm)	$1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot r$ (Nm)	Koefisien torsi	Perubahan Koef Torsi (%)	Daya	$0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$	Koef daya	Yplus	Courant Number	Number of Node	Number of Element
1	2	3	4	5	6	7 = 5/6	8	9 = ke-5 sudut * 5	10	11	12	13	14	15
1	0.07	973	40	16.806	226.555	0.0742		10.857	60.943	0.178	4.609	2.014	203806	331234
2			50	16.857	226.555	0.0744	0.303	10.890	60.943	0.179	4.609			
3			60	16.99	226.555	0.0750	0.783	10.976	60.943	0.180	4.6			
4			70	17.071	226.555	0.0754	0.474	11.028	60.943	0.181	4.611			

LAMPIRAN 4. TABEL PERHITUNGAN *GRID INDEPENDENCE*

No	Time step size	number time step	max. number iteration	Number of Node	Number of Element	Torsi (Nm)	$1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot r$ (Nm)	Koefisien torsi	rubahan Koef Torsi (Daya	$0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$	Koef daya	Yplus	Courant Number	Aspect Ratio	Skewness
1	2	3	4	5	6	7	8	9=7/8	10	11=kec.sudut*7	12	13	14	15		
1	0.07	973	70	203,806	331,234	17.071	226.555	0.075		11.028	60.943	0.181	4.609	2.014	9.0267	0.77716
2				225,652	374328	24.507	226.555	0.108	30.342	15.832	60.943	0.260	4.263			0.7729
3				262336	447110	27.172	226.555	0.120	9.808	17.553	60.943	0.288	4.226			0.77541
4				307500	536916	26.416	226.555	0.117	-2.862	17.065	60.943	0.280	4.435			0.76366
5				327068	575829	27.987	226.555	0.124	5.613	18.080	60.943	0.297	4.39			0.795

LAMPIRAN 5. TABEL PERHITUNGAN TURBIN DARRIEUS SAVONIUS MODEL A

Model A												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.215	29.18215613	204.275	0.07	2919	70	30.923	226.555	0.136	6.655	60.943	0.109
1.2	0.323	19.45477076	136.183	0.07	1946	70	17.658	226.555	0.078	5.700	60.943	0.094
1.6	0.430	14.59107807	102.138	0.07	1460	70	7.998	226.555	0.035	3.442	60.943	0.056
2	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	0	226.555	0.000	0.000	60.943	0.000

LAMPIRAN 6. TABEL PERHITUNGAN TURBIN DARRIEUS SAVONIUS MODEL B

Model B												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A_s \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A_s \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.2152	29.18215613	204.275	0.07	2919	70	33.27	226.555	0.147	7.160	60.943	0.117
1.2	0.3228	19.45477076	136.183	0.07	1946	70	39.458	226.555	0.174	12.737	60.943	0.209
1.6	0.4304	14.59107807	102.138	0.07	1460	70	36.307	226.555	0.160	15.627	60.943	0.256
2	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	14.528	226.555	0.064	7.816	60.943	0.128

LAMPIRAN 7. TABEL PERHITUNGAN TURBIN SAVONIUS

Savonius Turbine												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A_s \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A_s \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.2152	29.18215613	204.275	0.07	2919	70	36.014	226.555	0.159	7.750	60.943	0.127
1.2	0.3228	19.45477076	136.183	0.07	1946	70	37.083	226.555	0.164	11.970	60.943	0.196
1.6	0.4304	14.59107807	102.138	0.07	1460	70	30.92	226.555	0.136	13.308	60.943	0.218
1.9	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	-3.767	226.555	0.000	-2.027	60.943	0.000
2	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	-3.767	226.555	-0.017	-2.027	60.943	-0.033

LAMPIRAN 8. TABEL PERHITUNGAN PENGARUH SUDUT PITCH TERHADAP KINERJA TURBIN DARRIEUS SAVONIUS

Sudut 8°

8°												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A_s \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A_s \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.2152	29.18215613	204.275	0.07	2919	70	33.27	226.555	0.147	7.160	60.943	0.117
1.2	0.3228	19.45477076	136.183	0.07	1946	70	39.458	226.555	0.174	12.737	60.943	0.209
1.6	0.4304	14.59107807	102.138	0.07	1460	70	36.307	226.555	0.160	15.627	60.943	0.256
2	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	14.528	226.555	0.064	7.816	60.943	0.128

Sudut 6°

6°												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A_s \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A_s \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.215	29.18215613	204.275	0.07	2919	70	30.923	226.555	0.136	6.655	60.943	0.109
1.2	0.323	19.45477076	136.183	0.07	1946	70	17.658	226.555	0.078	5.700	60.943	0.094
1.6	0.430	14.59107807	102.138	0.07	1460	70	7.998	226.555	0.035	3.442	60.943	0.056
2	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	0	226.555	0.000	0.000	60.943	0.000

Sudut 2°

2°												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A_s \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A_s \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.2152	29.18215613	204.275	0.07	2919	70	29.84	226.555	0.132	6.422	60.943	0.105
1.2	0.3228	19.45477076	136.183	0.07	1946	70	32.123	226.555	0.142	10.369	60.943	0.170
1.6	0.4304	14.59107807	102.138	0.07	1460	70	23.09	226.555	0.102	9.938	60.943	0.163
2	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	-9.567	226.555	-0.042	-5.147	60.943	-0.084

Sudut 0°

0°												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A_s \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A_s \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.215	29.182	204.275	0.07	2919	70	28.213	226.555	0.125	6.071	60.943	0.100
1.2	0.323	19.455	136.183	0.07	1946	70	30.661	226.555	0.135	9.897	60.943	0.162
1.6	0.430	14.591	102.138	0.07	1460	70	20.432	226.555	0.090	8.794	60.943	0.144
2	0.538	11.673	81.710	0.07	1168	70	-11.275	226.555	-0.050	-6.066	60.943	-0.100

Sudut -2°

-2°												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.2152	29.18215613	204.275	0.07	2919	70	25.495	226.555	0.113	5.487	60.943	0.090
1.2	0.3228	19.45477076	136.183	0.07	1946	70	22.09	226.555	0.098	7.131	60.943	0.117
1.6	0.4304	14.59107807	102.138	0.07	1460	70	15.609	226.555	0.069	6.718	60.943	0.110
2	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	-1.948	226.555	-0.009	-1.048	60.943	-0.017

Sudut -6°

-6°												
TSP	ω (rad/s)	Periode (s)	Total time [7 Rot] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque	$1/4 \cdot \rho \cdot A \cdot D \cdot U^2$ (Nm)	Torque Coeff.	Power	$1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$	Power Coeff.
1	2	3		4	5	6	7	8	9=8/7	10=2*7	11	12=11/10
0.8	0.2152	29.18215613	204.275	0.07	2919	70	21.121	226.555	0.093	4.545	60.943	0.075
1.2	0.3228	19.45477076	136.183	0.07	1946	70	21.949	226.555	0.097	7.085	60.943	0.116
1.6	0.4304	14.59107807	102.138	0.07	1460	70	15.751	226.555	0.070	6.779	60.943	0.111
2	0.538	11.67286245	81.710	0.07	1168	70	-11.66	226.555	-0.051	-6.273	60.943	-0.103

**LAMPIRAN 9. TABEL PERHITUNGAN POTENSI ENERGI LISTRIK DARI ARUS LAUT DI PERAIRAN PULAU
GILIYANG, MADURA TAHUN 2015**

Bulan ke	U/kecepatan arus laut (m/s)	Optimum TSR	ω (rad/s)	RPM	Periode (s)	Total time [7 ROT] (s)	Time step	Number time step	Number of max iteration	Torque (Nm)	Power (Watt)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.379	1.6	0.606	5.793	10.357	72.500	0.07	1036	70	24.511	14.862
2	0.172		0.275	2.628	22.834	159.838		2284		10.286	2.829
3	0.132		0.211	2.020	29.706	207.941		2971		6.145	1.299
4	0.086		0.138	1.317	45.567	318.970		4557		0.000	0.000
5	0.252		0.404	3.860	15.546	108.819		1555		21.841	8.823
6	0.331		0.529	5.059	11.860	83.023		1187		42.733	22.627
7	0.389		0.622	5.946	10.090	70.630		1009		14.879	9.261
8	0.393		0.628	6.000	10.000	69.997		1000		47.333	29.726
9	0.404		0.647	6.181	9.707	67.946		971		50.029	32.368
10	0.323		0.516	4.933	12.163	85.138		1217		34.544	17.836
11	0.156		0.249	2.384	25.171	176.197		2518		42.733	10.662
12	0.173		0.277	2.646	22.679	158.756		2268		14.713	4.074
										sum	154.367

“Halaman ini sengaja dikosongkan”